



TUGAS AKHIR - TL 141584

**PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK
ANODA TUMBAL PADA PIPA BAJA API 5L
GRADE B DENGAN VARIASI JUMLAH
COATING YANG DIPASANG DI DALAM
TANAH**

**PRIBADI RIDZKY MULYONO
NRP 2713 100 085**

**Dosen Pembimbing :
Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.
Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng)**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**DESIGN SYSTEM OF SACRIFIAL ANODE
CATHODIC PROTECTION IN STEEL PIPE API 5L
GRADE B WITH A COATING NUMBER
VARIATION INSTALLED IN SOIL**

PRIBADI RIDZKY MULYONO
NRP 2713 100 085

Advisor :
Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc.
Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng)

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

PRIBADI RIDZKY MULYONO

NRP 2713 100 085

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

Tubagus Noor Rohmannudin. ST., M.Sc. (Pembimbing I)

Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng) (Pembimbing II)



PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK ANODA TUMBAL PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DENGAN VARIASI JUMLAH COATING YANG DIPASANG DI DALAM TANAH

Nama : Pribadi Ridzky Mulyono
NRP : 2713 100 085
Departemen : Teknik Material
Dosen Pembimbing : Tubagus Noor R. ST., M.Sc.
Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng)

ABSTRAK

Proteksi katodik anoda tumbal adalah salah satu jenis perlindungan logam dari serangan korosi. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk merancang proteksi katodik pada pipa dengan tipe API 5L dengan variabel coating. Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah perbedaan ketebalan *coating* yaitu 1 layer dan 2 layer. Dimensi panjang pipa API 5L yang digunakan adalah 1,5m, sedangkan jenis *coating* yang digunakan yaitu *base coat* dan *top coat*. Pengukuran yang dilakukan adalah pengukuran resistivitas tanah dan pH pada tanah tempat pipa digunakan. Pada penelitian terhaslkan bahwa Ketebalan Layer Coating mempengaruhi Angka Arus proteksi pada sistem katodik protek anoda korban dengan meningkatnya jumlah layer tingkat kebutuhan arus semakin rendah dimana layer Coating Sekunder dengan 2 lapis membutuhkan arus paling kecil yaitu 0.40 mA dengan nilai yang paling tinggi dengan Coating primer dengan 1.21 mA

Kata-kata kunci: Korosi, Proteksi Katodik, Anoda Korban, SACP, API 5L

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DESIGN SYSTEM OF SACRIFIAL ANODE CATHODIC PROTECTION IN STEEL PIPE API 5L GRADE B WITH A COATING NUMBER VARIATION INSTALLED IN SOIL

Name : Pribadi Ridzky Mulyono
NRP : 2713 100 108
Department : Materials Engineering
Advisors : Tubagus Noor R. ST., M.Sc.
Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng)

ABSTRACT

The sacrificial anode cathodic protection is one type of metal protection from corrosion attack. The purpose of this research is to design cathodic protection on pipe with API type 5L with coating variable. Variable used in this research is difference of coating thickness that is 1 layer and 2 layer. The 5L API pipe length dimension used is 1.5m, while the type of coating used is base coat and top coat. Measurements taken are the measurement of soil resistivity and pH on the ground where the pipe is used. In the research result that the thickness of Layer Coating influences the number of protection current on cathodic system of victim anode protective with increasing number of layer level of current requirement is lower where Secondary Coating layer with 2 layers require the smallest current that is 0.40 mA with the highest value with primary coating With 1.21 mA

Keywords: *SS 316L, TIG, current, travel speed, microstructure, hardness.*

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir serta menyusun laporan tugas akhir dengan judul **“PERANCANGAN SISTEM PROTEKSI KATODIK ANODA TUMBAL PADA PIPA BAJA API 5L GRADE B DENGAN OPTIMASI POTENSIAL PROTEKSI UNTUK VARIASI JUMLAH COATING YANG DIPASANG DI DALAM TANAH”**. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi mata kuliah tugas akhir yang menjadi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Departemen Teknik Material - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam pengerjaan tugas akhir ini. Tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, diantaranya:

- 1 Orang Tua dan Kerabat yang dengan serta merta menyemangati dan memberi do'a untuk terselesaikannya tugas akhir.
- 2 Bapak Tubagus Noor R S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan ilmu selama pengerjaan tugas akhir.
- 3 Bapak Dr. Lukman N, ST., M.Sc (Eng) selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
- 4 Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta, S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material FTI-ITS.

- 5 Tim Dosen Penguji seminar dan sidang tugas akhir, serta seluruh bapak dan ibu dosen dan karyawan di lingkungan Departemen Teknik Material FTI-ITS yang tak kenal lelah dalam mendidik putra-putri terbaik bangsa ini.
- 6 Teman-teman yang telah banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
- 7 Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis menyadari masih terdapat banyak yang dapat di kembangkan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, Juli 2017
Penulis,

Pribadi Ridzky Mulyono
2713100085

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Korosi	5
2.2 Elektrokimia dan Redox	8
2.3 Deret Volta	10
2.4 Sel Galvani dan Contohnya	12
2.5 Laju Korosi	16
2.5.1 Polarisasi	16
2.5.2 Pasivasi	17
2.6 Jenis-jenis Korosi	18
2.6.1 Korosi Sumuran	18
2.6.2 Korosi Crevice	19
2.6.3 Korosi Merata	20
2.6.4 Korosi Erosi	21
2.6.5 Korosi Retak Tegang	23
2.7 Korosi Pipa Baja Dalam Tanah	23
2.7.1 Tekstur dan Struktur Tanah	27
2.7.2 Resistivitas	28
2.7.2.1 Uji Resistivitas Tanah	29
2.7.3 Kelembaban Tanah	31

2.7.4 Keasaman Tanah	33
2.7.5 Kelarutan Garam	35
2.7.6 Hubungan Potensia, pH, dan Korosi	36
2.7.7 Pengaruh Lingkungan Terhadap Korosi	37
2.8 Konsep Pengendalian Korosi	40
2.9 Elektroda Referensi	45
2.10 Proteksi Katodik	46
2.11 Proteksi Katodik Anoda Korban	49
2.12 Proteksi Katodik Arus Paksa	51
2.13 Anoda	53
2.14 Kedalaman Tanam Anoda Groundbed	54
2.15 Lapisan <i>Coating</i>	56
2.15.1 <i>Coating</i> Primer	57
2.15.2 <i>Coating</i> Sekunder	58
2.16 Potensial Proteksi	58
2.17 Densitas Arus	62
2.18 <i>Overprotection</i>	62
2.19 Diagram Pourbaix	63
2.20 Parameter Desain Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban	67
2.21 Desain Perhitungan Proteksi Katodik Anoda Korban	71
2.22 Penelitian Sebelumnya	74
BAB III METODOLOGI	
3.1 Diagram Alir	77
3.2 Bahan Penelitian	78
3.3 Peralatan	78
3.4 Langkah Perancangan	78
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis Data	89
4.1.1 Kriteria Desain	89
4.1.2 Standar Desain Perancangan	89
4.2 Pengumpulan Data	89
4.2.1 Data Material	89
4.2.2 Data Tanah	90

4.2.3 Perhitungan Desain	94
4.2.3.1 Menghitung Resistansi Groundbed Anoda	96
4.2.3.2 Arus Keluaran Anoda	97
4.2.4 Data Anoda	97
4.2.5 Data Backfill Anoda	97
4.3 Perhitungan Arus dan Potensial	98
4.4 Hasil Proteksi	104
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	111
5.2 Saran	111
DAFTAR PUSTAKA xxiii	
LAMPIRAN xxv	
BIODATA PENULIS xlv	

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses Korosi	7
Gambar 2.2	Bagian Sel Volta/Galvani	13
Gambar 2.3	Notasi Sel	14
Gambar 2.4	Sel Kering	15
Gambar 2.5	Mekanisme Korosi Sumuran	19
Gambar 2.6	Contoh Korosi Celah	20
Gambar 2.7	Korosi Merata	21
Gambar 2.8	Korosi Erosi	22
Gambar 2.9	Korosi SCC	23
Gambar 2.10	Laju Korosi pada Penambahan Oxidizer	24
Gambar 2.11	Sirkuit Dasar Metode Wenner	30
Gambar 2.12	Beberapa Jenis Pengukuran Resistivitas Tanah	31
Gambar 2.13	Korosi Logam Tanah dipengaruhi pH	33
Gambar 2.14	Korosi pada Knalpot kendaraan Bermotor	39
Gambar 2.15	Pelapisan dengan Krom	42
Gambar 2.16	Pelapisan dengan Timah	42
Gambar 2.17	Pelapisan dengan Zinc	43
Gambar 2.18	Potensial Elektroda Referensi terhadap SHE	46
Gambar 2.19	Proteksi Katodik	48
Gambar 2.20	Point Deep Well Anode Groundbed	55
Gambar 2.21	Diagram Pourbaix	59
Gambar 2.22	Maksimum Konsentrasi <i>impurities</i> untuk anoda Al dan Zn berdasarkan DNV RP 401	70
Gambar 2.23	Grafik potensial proteksi pipa	75
Gambar 3.1	Diagram alir	77
Gambar 3.2	Pengukuran Resistivitas Tanah	79
Gambar 3.3	Pengukuran pH Tanah	80
Gambar 3.4	Pengukuran diameter Dalam Pipa	83
Gambar 3.5	Pengukuran diameter Luar Pipa	83
Gambar 3.6	Pengukuran pipa baja Api 5L Grade B	84
Gambar 3.7	Pembersihan pipa dari pengotor	84
Gambar 3.8	Pengait kabel pada pipa baja	85

Gambar 3.9 Pemberian <i>Coating</i> dengan <i>Coating</i> Primer	85
Gambar 3.10 Pemberian <i>Coating</i> dengan <i>Coating</i> Sekunder	86
Gambar 3.11 Pengukuran Tegangan Proteksi	87
Gambar 4.1 Hasil Grafik V pipa Proteksi	101
Gambar 4.2 Data Pengujian Arus Pipa	103
Gambar 4.3 Pipa <i>Coating</i> Setelah 30 hari Pemberian Proteksi	105
Gambar 4.4 Pipa <i>Coating</i> Sekunder dengan 2 lapis mulai mengalami keretakan lapisan <i>coating</i> di beberapa daerah	106
Gambar 4.5 Pipa <i>coating</i> dengan 1 lapis sekunder terjadi korosi di titik tertentu	106

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Konstanta <i>Corrosion</i> Rate Unit Desire	16
Tabel 2.2	Ukuran Partike pada Tekstur Tanah	28
Tabel 2.3	Pengaruh Resistivitas Tanah Terhadap Laju Korosifitas	29
Tabel 2.4	Data Hubungan pH Tanah dengan Sifat Korosif	34
Tabel 2.5	Spesifikasi Anoda	53
Tabel 2.6	Tabel Pourbaix	60
Tabel 2.7	Densitas Arus	62
Tabel 2.8	Kebutuhan Arus Proteksi berdasarkan ISO 15589	68
Tabel 2.9	Komposisi Kimia Anoda Paduan Zn	69
Tabel 2.10	<i>Rule of Thumb</i> Pemilihan Anoda	70
Tabel 4.1	Komposisi Kimia Baja API 5L Grade B	90
Tabel 4.2	Resistivitas Tanah	90
Tabel 4.3	Data pH	92
Tabel 4.4	Dimensi Produk Anoda Zinc	97
Tabel 4.5	Potensial Pipa Pada Tanah	98
Tabel 4.6	Nilai Proteksi Katodik Pipa	100
Tabel 4.7	Data Arus Pengujian	

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



BAB I **PENDAHULUAN**

1.1. Latar Belakang

Korosi adalah kerusakan atau degradasi logam akibat reaksi redoks antara suatu logam dengan berbagai zat di lingkungannya yang menghasilkan senyawa-senyawa yang tidak dikehendaki. Dalam bahasa sehari-hari, korosi disebut perkaratan. Contoh korosi yang paling lazim adalah perkaratan besi.

Dalam kehidupan sehari-hari, korosi dapat kita jumpai terjadi pada berbagai jenis logam. Bangunan-bangunan maupun peralatan elektronik yang memakai komponen logam seperti seng, tembaga, besi baja, dan sebagainya semuanya dapat terserang oleh korosi ini. Selain pada perkakas logam ukuran besar, korosi ternyata juga mampu menyerang logam pada komponen-komponen renik peralatan elektronik, mulai dari jam digital hingga komputer serta peralatan canggih lainnya yang digunakan dalam berbagai aktivitas umat manusia, baik dalam kegiatan industri maupun di dalam rumah tangga.

Korosi merupakan salah satu masalah utama dalam dunia industri. Tentunya karena korosi menyebabkan kegagalan pada material yang berujung pada kerusakan pada peralatan atau kegagalan pada operasi yang menimbulkan kerugian yang tidak sedikit. Pengendalian korosi dapat dilakukan dengan berbagai cara. Untuk mengendalikan serangan korosi internal dibagian dalam pipa, dapat dilakukan dengan menggunakan metode *lining* atau menggunakan *inhibitor*. Untuk mencegah korosi pada bagian luar pipa dapat dilakukan dengan cara mengubah lingkungan sekitar pipa menjadi tidak korosif. Upaya lain untuk mengendalikan serangan korosi pada bagian luar pipa juga dapat dilakukan dengan menggunakan coating. Selain kedua metode tersebut, pengendalian korosi dapat menggunakan system proteksi katodik. Proteksi katodik dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu metode *impressed current* dan metode anoda korban (*sacrificial/galvanic anode*).



Proses Perlindungan dengan pelapisan logam ini dilakukan dengan sistem electroplating dimana logam pelapis dalam contoh ini nikel bertindak sebagai anoda, sedangkan benda kerja yang dilapisi sebagai katoda. Dalam operasi pelapisan, kondisi operasi perlu diperhatikan karena akan menentukan berhasil tidaknya proses pelapisan serta mutu yang diinginkan, dalam kaitannya dengan tebal lapisan yang terbentuk pada logam dasar, ada beberapa kondisi operasi yang mempengaruhi, diantaranya rapat arus, konsentrasi larutan, temperature.

Lalu untuk perlindungan dengan proteksi katodik anoda korban ini dilakukan dengan system galvanic dimana logam yang mempunyai nilai potensial rendah dalam contoh yaitu zinc menjadi anoda dan yang mempunyai potensial yang lebih tinggi yaitu logam yang ingin dilindungi

Tugas akhir ini akan membahas sistem proteksi katodik *Sacrificial Anode* (anoda korban) yang disimulasikan untuk mengevaluasi kinerja sistem proteksi katodik Anoda Korban (*Sacrificial Anode*) sehingga dapat menentukan efektifitas pada sistem proteksi tersebut.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang terdapat pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mendesain sistem proteksi anoda korban (*Sacrificial Anode Cathodic Protection*) pada pipa baja API 5L Grade B
2. Apa saja faktor faktor dalam sistem kerja proteksi anoda korban (*sacrificial anode cathodic protection*) pada pipa baja yang berada di dalam tanah yang dapat mempengaruhi sistem kerja tersebut.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :



1. Merancang (desain) sistem proteksi anoda korban pada pipa baja API 5L Grade B yang sesuai dengan nilai standar proteksi pada NACE RP169-2002.
2. Menganalisa faktor faktor yang mempengaruhi sistem kerja proteksi anoda korban pada pipa baja API 5L grade B pada tanah.

1.4. Batasan dan Ruang Lingkup Penelitian

Batasan-batasan dari permasalahan yang dibahas didalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pipa baja yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe API 5L grade B
2. Pipa yang digunakan diberikan proses Coating Jenis Epoxy.
3. Pipa tertanam pada tempat Departemen Teknik Material FTI-ITS

1.5. Manfaat penelitian Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilakukan untuk memberikan manfaat antara lain antara lain:

1. Menghasilkan rancangan sistem proteksi katodik anoda korban pada pipa API 5L grade B dengan perbedaan coating
2. Dapat mempelajari pengaruh yang mempengaruhi sistem proteksi anoda korban pada pipa API 5L grade B dalam tanah



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

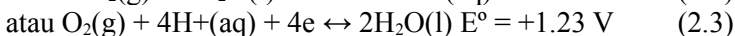
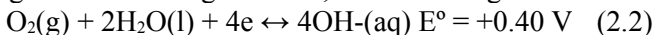
2.1 Korosi

Indonesia merupakan negara yang beriklim tropis dengan tingkat curah hujan dan kelembaban yang tinggi serta intensitas sinar matahari yang tinggi pula, dan sebagai Negara berkembang, di Indonesia juga banyak bermunculan industri-industri yang mempunyai pengaruh cukup besar terhadap tingkat pencemaran pada lingkungan. Fenomena alam dan material khususnya logam mempunyai suatu keterikatan dalam suatu sistem dan proses. Hubungan tersebut diimplementasikan dalam suatu proses kerusakan yang dinamakan korosi.

Korosi adalah reaksi redoks antara suatu logam dengan berbagai zat di lingkungannya yang menghasilkan senyawa-senyawa yang tak dikehendaki. Dalam bahasa sehari-hari, korosi disebut perkaratan. Contoh korosi yang paling lazim adalah perkaratan besi. Pada peristiwa korosi, logam mengalami oksidasi, sedangkan oksigen (udara) mengalami reduksi. Karat logam umumnya adalah berupa oksida dan karbonat. Rumus kimia karat besi adalah $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, suatu zat padat yang berwarna coklat-merah. Korosi merupakan proses elektrokimia. Pada korosi besi, bagian tertentu dari besi itu berlaku sebagai anoda, di mana besi mengalami oksidasi.



Elektron yang dibebaskan di anode mengalir ke bagian lain besi itu yang bertindak sebagai katoda, di mana oksigen tereduksi.



Adapun syarat terjadinya korosi adalah :

1. Adanya katoda
2. Adanya anoda
3. Adanya lingkungan



Tanpa adanya salah satu syarat di atas maka korosi tidak akan terjadi. Korosi tidak dapat di hilangkan tetapi hanya dapat di minimalisir pertumbuhannya.

Kecepatan korosi sangat tergantung pada banyak faktor, seperti ada atau tidaknya lapisan oksida, karena lapisan oksida dapat menghalangi beda potensial terhadap elektrode lainnya yang akan sangat berbeda bila masih bersih dari oksida. Korosi pada besi menimbulkan banyak kerugian, karena barang-barang atau bangunan yang menggunakan besi menjadi tidak awet. Korosi pada besi dapat dicegah dengan membuat besi menjadi baja tahan karat (*stainless steel*), namun proses ini membutuhkan biaya yang mahal, sehingga tidak sesuai dengan kebanyakan penggunaan besi. Penggunaan struktur yang terbuat dari besi dan baja kini memiliki peranan yang sangat penting dalam dunia industri terutama pada penggunaan untuk saluran air, saluran gas, maupun tiang konstruksi. Struktur yang diaplikasikan pada kegiatan tersebut didesain sedemikian rupa agar dapat dipakai hingga 30-50 tahun.

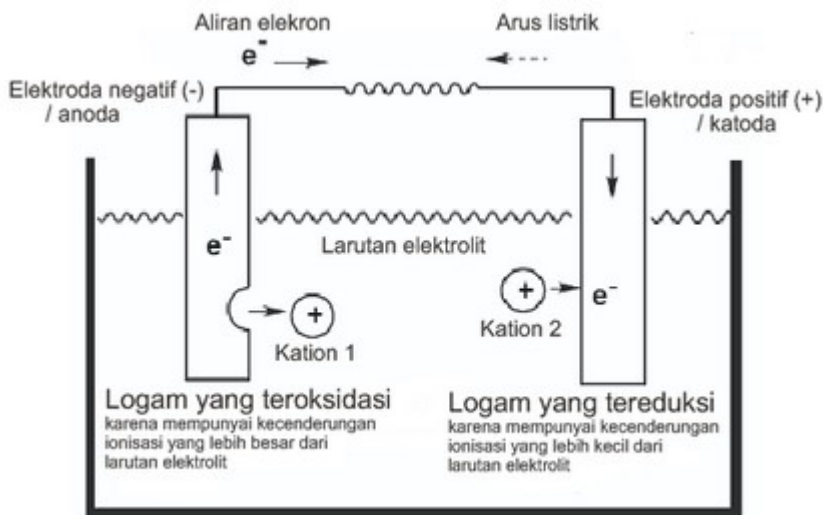
Namun pada kenyataannya timbul banyak permasalahan yang menyebabkan turunnya kualitas baja tersebut hingga terjadi kerusakan yang sangat parah. Hal ini dikarenakan korosi yang menjadi penyebab utama terhadap kegagalan material dimana dampak yang ditimbulkan akan berimbas pada lingkungan dan ekonomi. Oleh karena itu, berbagai upaya terus dilakukan guna untuk mempertahankan masa pemakaian yang lebih lama dan sesuai standar.

Selain itu, kondisi pada struktur yang dipendam didalam tanah dapat membuat masalah menjadi lebih kompleks. Pada umumnya, korosi pada tanah dapat dibatasi dengan pengukuran resistivitas tanah dan potensial struktur terhadap tanah. Namun setelah diteliti kembali masih terdapat banyak faktor yang dapat menyebabkan timbulnya korosi pada tanah, diantaranya ialah jenis tanah, kelembaban, pH tanah, dan cacat/goresan pada baja yang dapat menimbulkan korosi sumuran. Pelapisan (*Coating*) menjadi solusi untuk menjaga kestabilan dan penghalang terhadap

lingkungan korosif untuk mengurangi laju degradasi. Lapisan tambahan diberikan untuk mengisolasi struktur agar terhindar dari lingkungan luar yang dapat menimbulkan korosi.

Pada proses korosi ada dua reaksi yang menyebabkan terjadinya korosi yaitu reaksi oksidasi dan reaksi reduksi. Pada reaksi oksidasi akan terjadi pelepasan elektron oleh material yang lebih bersifat anodik. Sedangkan reaksi reduksi adalah pemakaian elektron oleh material yang lebih bersifat katodik.

Proses korosi secara galvanis dapat kita lihat pada gambar berikut :



Gambar 2.1 Proses Korosi

Pada reaksi di atas dapat kita lihat dimana Cu bertindak sebagai katoda mengalami pertambahan massa dengan melekatnya electron pada Cu. Sedangkan Zn bertindak sebagai anoda, dimana terjadinya pengurangan massa Zn yang di tandai dengan lepasnya elektron dari Zn. Peristiwa pelepasan dan penerimaan elektron ini harus mempunyai lingkungan, dimana yang menjadi lingkungan adalah asam sulfat. Jika ada dua buah



unsur yang di celupkan dalam larutan elektrolit yang di hubungkan dengan sumber arus maka yang akan mengalami korosi adalah material yang lebih anodik.(Tretheway,1991)

2.2 Elektrokimia dan Redox

Elektrokimia adalah cabang kimia yang mempelajari reaksi kimia yang berlangsung dalam larutan pada antarmuka konduktor elektron (logam atau semikonduktor) dan konduktor ionik (elektrolit), dan melibatkan perpindahan elektron antara elektroda dan elektrolit atau sejenis dalam larutan. Jika reaksi kimia didorong oleh tegangan eksternal, maka akan seperti elektrolisis, atau jika tegangan yang dibuat oleh reaksi kimia seperti di baterai, maka akan terjadi reaksi elektrokimia. Sebaliknya, reaksi kimia terjadi di mana elektron yang ditransfer antara molekul yang disebut oksidasi / reduksi (redoks) reaksi. Secara umum, elektrokimia berkaitan dengan situasi di mana oksidasi dan reduksi reaksi dipisahkan dalam ruang atau waktu, dihubungkan oleh sebuah sirkuit listrik eksternal.

Ada dua jenis sel elektrokimia, yaitu sel galvanik dan elektrolit. Sel galvanik adalah sel yang menghasilkan tenaga listrik ketika sel mengalami reaksi kimia sedangkan Sel elektrolit adalah sel yang mengalami reaksi kimia ketika tegangan listrik diterapkan. Elektrolisis dan korosi adalah contoh dari proses penting seperti yang ada pada elektrokimia. Prinsip-prinsip dasar elektrokimia didasarkan pada rasio tegangan antara dua zat dan memiliki kemampuan untuk bereaksi satu sama lain. Semakin lama logam dalam elemen galvanik yang terpisah dalam seri tegangan elektrokimia, semakin kuat listrik akan terekstrak. Teori Elektro-kimia dan metode elektrokimia memiliki aplikasi praktis dalam teknologi dan industri dalam banyak cara. Penemuan dan pemahaman reaksi elektrokimia telah memberikan kontribusi untuk mengembangkan sel bahan bakar dan baterai, dan pemahaman logam relatif terhadap satu sama lain dalam elektrolisis dan korosi. Reaksi kimia yang terjadi pada antarmuka konduktor listrik (disebut elektroda yang dapat menjadi logam

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



atau semikonduktor) dan konduktor ionik (elektrolit) dapat menjadi solusi dan dalam beberapa kasus khusus, zat padat. Jika reaksi kimia didorong oleh beda potensial maka, secara eksternal disebut elektrolisis. Namun, jika penurunan potensi listrik dibuat sebagai hasil dari reaksi kimia, yang dikenal sebagai "daya baterai", juga disebut sel baterai atau galvanik. Reaksi kimia yang menghasilkan perpindahan elektron antara molekul yang dikenal sebagai reaksi redoks, dan pentingnya dalam elektrokimia sangat penting, karena melalui reaksi tersebut dilakukan proses yang menghasilkan listrik atau sebaliknya, yang diproduksi sebagai konsekuensinya. Secara umum, studi elektrokimia menangani situasi di mana terdapat reaksi oksidasi-reduksi ditemukan dipisahkan secara fisik atau sementara, berada di lingkungan yang terhubung ke sebuah sirkuit listrik. Penelitian yang terakhir adalah kimia analitik dalam subdiscipline dikenal sebagai analisis potensiometri. Ada 2 prinsip sel elektrokimia:

1. Sel yang melakukan kerja dengan melepaskan energi dari reaksi spontan
2. Sel yang melakukan kerja dengan menyerap energi dari sumber listrik untuk menggerakkan reaksi non spontan.

Sel elektrokimia baik yang melepas atau menyerap energi selalu melibatkan perpindahan elektron-elektron dari satu senyawa ke senyawa yang lain dalam suatu reaksi oksidasi reduksi. Oksidasi adalah hilangnya elektron sedangkan reduksi diperolehnya elektron. Zat pengoksidasi adalah spesies yang melakukan oksidasi, mengambil elektron dari zat yang teroksidasi. Zat pereduksi adalah spesies yang melakukan reduksi memberikan elektron kepada zat yang tereduksi. Setelah reaksi zat teroksidasi memiliki bilangan oksidasi lebih tinggi sedangkan zat tereduksi memiliki bilangan oksidasi lebih rendah

Redoks adalah istilah yang menjelaskan berubahnya bilangan oksidasi (keadaan oksidasi) atom-atom dalam sebuah reaksi kimia. Hal ini dapat berupa proses redoks yang sederhana seperti oksidasi karbon yang menghasilkan karbon dioksida, atau reduksi karbon oleh hidrogen menghasilkan metana(CH_4),



ataupun ia dapat berupa proses yang kompleks seperti oksidasi gula pada tubuh manusia melalui rentetan transfer elektron yang rumit. Istilah redoks berasal dari dua konsep, yaitu reduksi dan oksidasi. Ia dapat dijelaskan dengan mudah sebagai berikut:

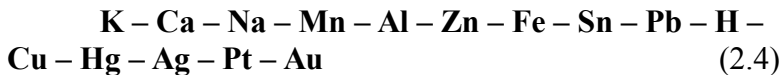
- Oksidasi menjelaskan pelepasan elektron oleh sebuah molekul, atom, atau ion
- Reduksi menjelaskan penambahan elektron oleh sebuah molekul, atom, atau ion.

Oksidasi dan reduksi tepatnya merujuk pada perubahan bilangan oksidasi karena transfer elektron yang sebenarnya tidak akan selalu terjadi. Sehingga oksidasi lebih baik didefinisikan sebagai peningkatan bilangan oksidasi, dan reduksi sebagai penurunan bilangan oksidasi. Dalam praktiknya, transfer elektron akan selalu mengubah bilangan oksidasi, namun terdapat banyak reaksi yang diklasifikasikan sebagai "redoks" walaupun tidak ada transfer elektron dalam reaksi tersebut (misalnya yang melibatkan ikatan kovalen). Reaksi non-redoks yang tidak melibatkan perubahan muatan formal (formal charge) dikenal sebagai reaksi metatesis.

(Day & Underwood, 1998)

2.3 Deret Volta

Untuk mengetahui unsur yang lebih anodik dan lebih katodik dapat kita lihat pada deret Volta. Berikut deret Volta :



Pada Deret Volta, unsur logam dengan potensial elektrode lebih negatif ditempatkan di bagian kiri, sedangkan unsur dengan potensial elektrode yang lebih positif ditempatkan di bagian kanan.

Semakin ke kiri kedudukan suatu logam dalam deret tersebut, maka

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



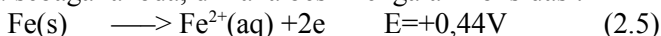
- Logam semakin reaktif (semakin mudah melepas elektron)
- Logam merupakan reduktor yang semakin kuat (semakin mudah mengalami oksidasi)

Sebaliknya, semakin ke kanan kedudukan suatu logam dalam deret tersebut, maka

- Logam semakin kurang reaktif (semakin sulit melepas elektron)
- Logam merupakan oksidator yang semakin kuat (semakin mudah mengalami reduksi)

Salah satu metode untuk mencegah korosi antara lain dengan menghubungkan logam (misalnya besi) dengan logam yang letaknya lebih kiri dari logam tersebut dalam deret volta (misalnya magnesium) sehingga logam yang mempunyai potensial elektrode yang lebih negatif lah yang akan mengalami oksidasi. Metode pencegahan karat seperti ini disebut perlindungan katodik. Contoh lain dari perlindungan katodik adalah pipa besi, tiang telepon, dan berbagai barang lain yang dilapisi dengan zink, atau disebut Galvanisasi. Zink dapat melindungi besi dari korosi sekalipun lapisannya tidak utuh. Oleh karena potensial reduksi besi lebih positif daripada zink (posisinya dalam deret Volta lebih ke kanan), maka besi yang kontak dengan zink akan membentuk sel elektrokimia dengan besi sebagai katode. Dengan demikian besi terlindungi dan zink yang mengalami oksidasi. Badan mobil-mobil baru pada umumnya telah digalvanisasi, sehingga tahan karat.

Selain contoh reaksi sebelumnya kita juga dapat lihat peristiwa korosi lainnya yaitu pada peristiwa perkaratan (korosi) logam Fe mengalami oksidasi dan oksigen (udara) mengalami reduksi. Rumus kimia dari karat besi adalah $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ dan berwarna coklat-merah. Pada korosi besi, bagian tertentu dari besi itu berlaku sebagai anoda, dimana besi mengalami oksidasi.





Ion besi (II) yg terbentuk pada anoda selanjutnya teroksidasi membentuk ion besi (III) yang kemudian membentuk senyawa oksida terhidrasi $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.

Berdasarkan sifatnya korosi terbagi atas :

1. Korosi Aktif

Ciri-ciri dari korosi aktif ini antara lain :

- Mudah melepaskan ion
- Mudah menempel di tangan

Contoh : Paku yang berkarat

2. Korosi Pasif

Ciri-ciri dari korosi pasif ini antara lain :

- Sulit melepaskan ion
- Sulit menempel di tangan

Contoh : Korosi pada AL

(Whiten, 2013)

2.4 Sel Galvani dan Contohnya

Sel volta atau sel galvani adalah suatu sel elektrokimia yang terdiri atas dua buah elektrode yang dapat menghasilkan energi listrik akibat terjadinya reaksi redoks secara spontan pada kedua elektroda tersebut. yaitu sel yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Sel Galvani / Sel Volta disebut juga sel kimia. Sel Galvani dipakai sebagai sumber listrik untuk penerangan, pemanasan, menjalankan motor, dan sebagainya. Reaksi redoks spontan yang dapat mengakibatkan terjadinya energi listrik ini ditemukan oleh Alessandro Guiseppe Volta (1800) dan Luigi Galvani (1780). Deret Volta pada Gambar 1 merupakan deret yang menyatakan unsur-unsur logam berdasarkan potensial elektrode standarnya. Dan ini digunakan sebagai acuan apakah sebuah logam bisa bereaksi dengan ion logam lain (Chang, 2005)

Untuk prinsip kerja sel galvani sendiri yaitu:

- a) Terdiri atas elektrode dan elektrolit yang dihubungkan dengan sebuah jembatan garam

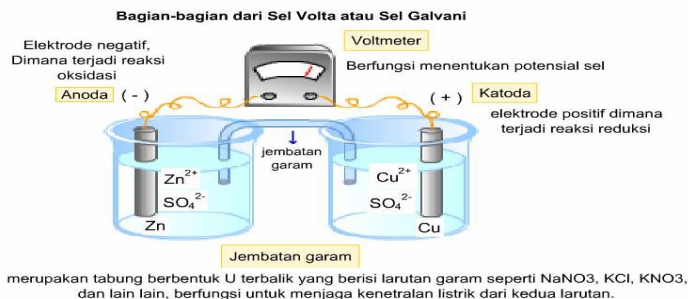


- b) Pada anode terjadi reaksi oksidasi dan pada katode terjadi reaksi reduksi
- c) Arus elektron mengalir dari katode ke anode
- d) Arus listrik mengalir dari katode ke anode
- e) Adanya jembatan garam untuk menyeimbangkan ion-ion

Untuk perlu dipahami juga anoda dan katoda adalah elektroda dengan polaritas yang berlawanan, Pada sel galvani, Anoda adalah elektroda sel kutub negatif (-), sedangkan katoda adalah elektroda sel yang berkutub (+). Anoda mengalami oksidasi (Pelepasan Elektron) yaitu sebagai reduktor sedangkan katoda mengalami reaksi reduksi (mengikat elektron) yaitu sebagai oksidator (Keenan,1980).

Bagian – bagian Sel Galvani atau Sel Volta (Gambar 2) yaitu:

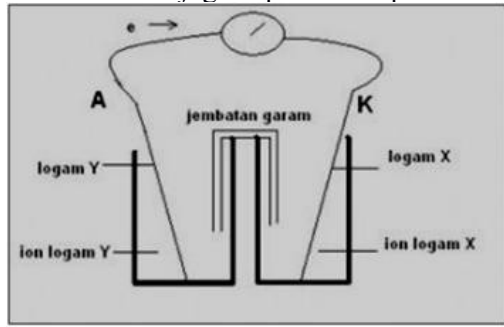
1. Voltmeter, untuk menentukan besarnya potensial sel
2. Jembatan garam (*salt bridge*), untuk menjaga kenetralan muatan listrik pada larutan
3. Anode, elektrode negatif, tempat terjadinya reaksi oksidasi. pada gambar, yang bertindak sebagai anode adalah elektrode Zn/seng (*zink electrode*)
4. Katode, elektrode positif, tempat terjadinya reaksi reduksi. Pada gambar 2, yang bertindak sebagai katode adalah elektrode Cu/tembaga (*copper electrode*)



Gambar 2.2 Bagian Sel volta/Galvani



Susunan Sel Voltanya dinotasikan dengan Notasi sel: $Y | \text{ion } Y || \text{ion } X | X$. Dimana pada bagian kanan menyatakan katode (yang mengalami reduksi), dan bagian kiri menyatakan anode (yang mengalami oksidasi). Pemisahan oleh jembatan garam dinyatakan dengan $||$ sedangkan batas fasa dinyatakan $|$. Penggambaran notasi sel juga dapat dilihat pada Gambar 3.

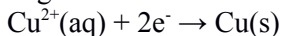


Gambar 2.3 Notasi Sel

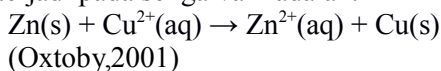
Pada gambar di atas, logam X mempunyai potensial reduksi yang lebih positif dibanding logam Y, sehingga logam Y bertindak sebagai anoda dan logam X bertindak sebagai katoda. Jembatan garam mengandung ion-ion positif dan ion-ion negatif yang berfungsi menetralkan muatan positif dan negatif dalam larutan elektrolit. Contoh Soal Penulisan Notasi Sel : Notasi sel untuk reaksi $\text{Cu}^{2+} + \text{Zn} \rightarrow \text{Cu} + \text{Zn}^{2+}$ yaitu $\text{Zn} | \text{Zn}^{2+} || \text{Cu}^{2+} | \text{Cu}$.

Proses yang terjadi adalah

- Pada anode, logam Zn melepaskan elektron dan menjadi Zn^{2+} yang larut. $\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^-$
- Pada katode, ion Cu^{2+} menangkap elektron dan mengendap menjadi logam Cu.



Hal ini dapat diketahui dari berkurangnya massa logam Zn setelah reaksi, sedangkan massa logam Cu bertambah. Reaksi total yang terjadi pada sel galvani adalah:



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Contoh beberapa Sel Galvani dalam kehidupan sehari-hari:

1. Sel Kering (Sel Leclanche)

Dikenal sebagai batu baterai. Pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa sel kering terdiri dari katode yang berasal dari karbon (grafit) dan anode logam zink. Elektrolit yang dipakai berupa pasta campuran MnO_2 , serbuk karbon dan NH_4Cl .

Persamaan reaksinya :

Katode : $2\text{MnO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$

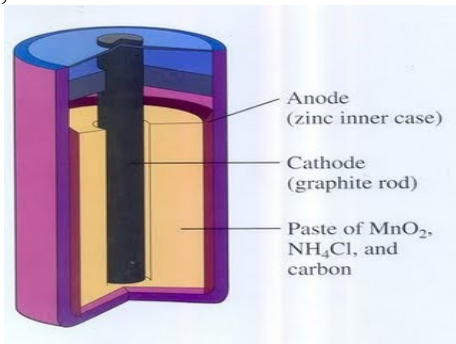
Anode : $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

Reaksi sel : $2\text{MnO}_2 + 2\text{H}^+ + \text{Zn} \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{Z}$

Anode (-) : Logam seng (Zn) yang dipakai sebagai wadah.

Katode (+) : Batang karbon (tidak aktif)

Elektrolit : Campuran berupa pasta yang terdiri dari MnO_2 , NH_4Cl , dan sedikit air



Gambar 2.4 Sel Kering

2. Sel aki

Sel aki disebut juga sebagai sel penyimpan, karena dapat berfungsi menyimpan listrik dan pada setiap saat dapat dikeluarkan. Anodenya terbuat dari logam timbal (Pb) dan katodenya terbuat dari logam timbal yang dilapisi PbO_2 . Reaksi penggunaan aki :

Anode : $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$

Katode : $\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Reaksi sel : $\text{Pb} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$



Reaksi Pengisian aki : $2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Pb} + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+$

Anode (-) : Lempeng logam timbal (Pb).

Katode (+) : Lempeng logam oksida timbal (PbO_2)

Elektrolit : Larutan asam sulfat (H_2SO_4) encer (Oman, 1999)

2.5 Laju Korosi

Laju korosi diperhitungkan dengan menyatakan berat yang hilang per satuan luas permukaan per satuan waktu. Mengingat laju korosi (mpy) merupakan ekspresi yang terbaik karena merupakan penetrasi korosi tanpa decimal, maka satuan laju korosi ini bias didekati dengan rumus

$$\text{CR} = (\text{K} \cdot \text{W}) / (\text{A} \cdot \text{T} \cdot \text{D})$$

Dimana

W = berat yang hilang (gram)

D = Densitas specimen (g/cm^3)

A = Luas permukaan specimen (cm^2)

T = waktu paparan (jam)

K = konstanta laju korosi (dapat dilihat pada table)

Tabel 2.1 Konstanta *Corrosion Rate* Unit Desire

Corrosion Rate Unit Desire	K
Mils per year (mpy)	$3,45 \times 10^6$
Inches per year (ipy)	$3,45 \times 10^3$
Inches per month (ipm)	$2,87 \times 10^2$
Millimetres per year (mm/y)	$8,76 \times 10^4$
Micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	$8,76 \times 10^7$
Picometres per second (pm/s)	$2,78 \times 10^6$
Grams per square meter per hour ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)	$1,00 \times 10^4 \times \text{D}$
Milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2,40 \times 10^6 \times \text{D}$



Berikut ini adalah beberapa faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi laju korosi suatu material:

2.5.1 Polarisasi

Suatu reaksi elektrokimia dikatakan terpolarisasi apabila terjadi proses perlambatan dari laju reaksi semula. Polarisasi bertindak sebagai pelapis tambahan, dan mempengaruhi tingkat pH dan konsentrasi ion pada elektrolit. Kecepatan pada reaksi elektrokimia terbatas oleh bermacam-macam faktor fisis dan kimia. Oleh karena itu reaksi elektrokimia dapat dikatakan sebagai polarisasi atau penurunan yang disebabkan oleh faktor lingkungan. Polarisasi dapat dibagi menjadi dua jenis yang berbeda yaitu akitifasi polarisasi dan konsentrasi polarisasi. Polarisasi aktivasi adalah polarisasi yang disebabkan oleh faktor pelambat yang berasal dari reaksi elektrokimia itu sendiri, yakni terjadinya evolusi terbentuknya gas hidrogen di katoda. Sebagai ilustrasi yang mudah adalah reaksi terlepasnya atom hidrogen pada logam *zinc* sebagai akibat dari korosi pada lingkungan asam. Tahapan proses tereduksinya hidrogen pada permukaan logam *zinc* dapat pula terjadi pada suatu jenis atom yang tereduksi pada permukaan logam. Tahap pertama atom tersebut harus dapat mengikat suatu permukaan sebelum terjadinya reaksi. Tahap kedua harus terjadi transfer elektron sebagai hasil reduksi dari atom tersebut. Tahap ketiga, dua atom hidrogen menyatu untuk membentuk gelembung dan pada tahap ke empat, gelembung tersebut menjadi gas hidrogen. Kecepatan reduksi pada ion hidrogen dapat dikendalikan dengan memperlambat empat tahap di atas.

2.5.2 Pasivasi

Pada dasarnya, pasivitas adalah lepasnya suatu unsur akibat reaksi kimia yang dialami oleh beberapa logam dan paduan pada suatu kondisi lingkungan khusus. Logam dan paduan yang mengalami pasivitas diantaranya besi, nikel, silicon, chromium, titanium dan paduan- paduannya. Observasi juga telah dilakukan

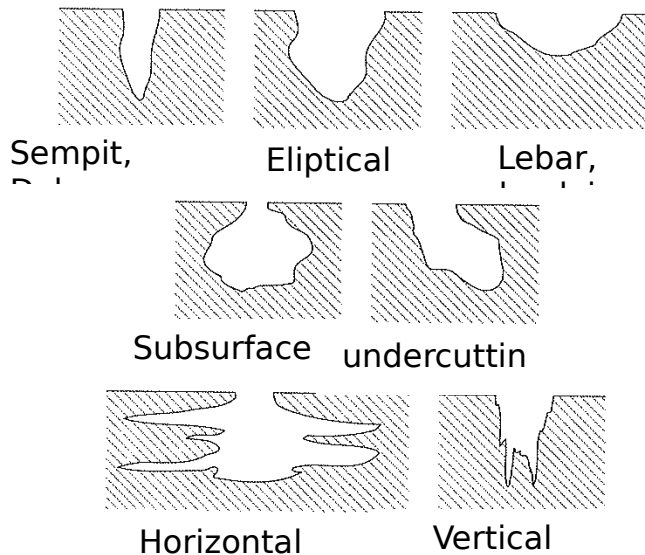


untuk mengetahui efek pasivitas pada beberapa logam, diantaranya *zinc*, *cadmium*, *tin* dan *thorium*. Pasivitas sulit untuk didefinisikan, karena pasivitas hanya dapat digambarkan secara kuantitatif dimana karakteristik suatu logam akan mengalami pengaruh yang luar biasa akibat pasivitas. Suatu pasivitas yang dialami oleh logam, dimana laju korosi logam tersebut dipengaruhi oleh daya oksidasi dengan menggunakan potensial elektron. Gambar tersebut mengilustrasikan bahwa sebuah logam dicelupkan pada lingkungan asam yang terbebas dari kandungan udara, lingkungan tersebut ditambahkan daya oksidasi pada titik A dan laju korosinya digambarkan dengan sebuah garis pada gambar tersebut. Jika daya oksidasi pada lingkungan ini meningkat, maka laju korosi pada logam tersebut juga meningkat.

2.6 Jenis - Jenis Korosi

2.6.1 Korosi sumuran

Korosi sumuran (*pitting corrosion*) merupakan korosi lokal yang terjadi pada permukaan yang terbuka akibat pecahnya lapisan pasif. Terjadinya korosi sumuran ini diawali dengan pembentukan lapisan pasif di permukaan bahan pada antar muka lapisan pasif dan elektrolit terjadi penurunan pH, sehingga terjadi pelarutan lapisan pasif secara perlahan-lahan dan menyebabkan lapisan pasif pecah dan terjadi korosi sumuran. Korosi sumuran ini sangat berbahaya karena lokasi terjadinya sangat kecil tetapi dalam, sehingga dapat menyebabkan peralatan atau struktur patah mendadak. (Fontana, 1986)



Gambar 2.5 Mekanisme Korosi sumuran (Sumber : Denni,1992)

2.6.2 Korosi Crevice

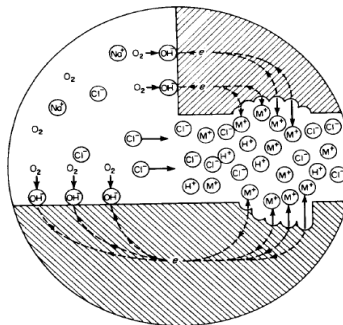
Korosi celah (*crevice corrosion*) adalah korosi lokal yang terjadi pada celah di antara dua komponen. Mekanisme terjadinya korosi celah ini diawali dengan terjadi korosi merata di luar dan di dalam celah, sehingga terjadi oksidasi logam dan reduksi oksigen. Apabila oksigen (O_2) di dalam celah telah habis sedangkan oksigen (O_2) di luar celah masih banyak, maka akibatnya permukaan logam yang berhubungan dengan bagian luar menjadi katode dan permukaan logam di dalam celah menjadi anoda sehingga terbentuk celah yang terkorosi. Korosi ini tidak tampak dari luar dan sangat merusak konstruksi. Sering terjadi pada sambungan kurang kedap. Penyebabnya, lubang, gasket, *lap joint*, kotoran/endapan

Pencegahan:



- 1 Penggunaan sistem sambungan butt joint dengan pengelasan dibanding dengan sambungan keling untuk peralatan baru
- 2 Celah sambungan ditutup dengan pengelasan atau dengan *soldering*
- 3 Peralatan – peralatan harus diperiksa dan dibersihkan secara teratur, terutama pada sambungan – sambungan yang rawan
- 4 Hindari pemakaian packing yang bersifat higroskopis
- 5 Penggunaan gasket dan absorbent seperti teflon jika memungkinkan
- 6 Pada desain saluran drainase, hindari adanya lengkungan – lengkungan tajam serta daerah genangan fluida

(Fontana, 1986)

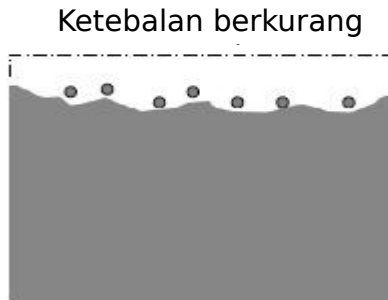


Gambar 2.6 contoh korosi celah (Sumber : Fontana, 1986)

2.6.3 Korosi Merata

Korosi merata (*uniform corrosion*) adalah korosi yang terjadi secara serentak diseluruh permukaan logam, oleh karena itu pada logam yang mengalami korosi merata akan terjadi pengurangan dimensi yang relatif besar per satuan waktu. Kerugian langsung akibat korosi merata berupa kehilangan material konstruksi, keselamatan kerja dan pencemaran

lingkungan akibat produk korosi dalam bentuk senyawa yang mencemarkan lingkungan. Sedangkan kerugian tidak langsung, antara lain berupa penurunan kapasitas dan peningkatan biaya perawatan (*preventive maintenance*) (Fontana,1986)



Gambar 2.7 Korosi Merata (Sumber : Fontana,1986)

2.6.4 Korosi Erosi

Korosi erosi adalah korosi yang terjadi pada permukaan logam yang disebabkan aliran fluida yang sangat cepat sehingga merusak permukaan logam dan lapisan film pelindung. Korosi erosi juga dapat terjadi karena efek-efek mekanik yang terjadi pada permukaan logam, misalnya : pengausan, abrasi dan gesekan. Logam yang mengalami korosi erosi akan menimbulkan bagian-bagian yang kasar dan tajam.

Proses terjadinya korosi secara umum adalh melalui beberapa tahap berikut :

1. Pada tahap pertama terjadi serangan oleh gelembung udara yang menempel di permukaan lapisan pelindung logam, karena adanya aliran turbulen yang melintas di atas permukaan logam tersebut.
2. Pada tahap kedua gelembung udara tersebut mengikis dan merusak lapisan peindung.
3. Pada tahap ketiga, laju korosi semakin meningkat, karena lapisan pelindung telah hilang. Logam yang berada di



bawah lapisan pelindung mulai terkorosi, sehingga membentuk cekungan, kemudian terjadi pembentukan kembali lapisan

pelindung dan logam, menjadi tidak rata. Bila aliran terus mengalir, maka akan terjadi serangan kembali oleh gelembung udara yang terbawa aliran. Serangan ini akan mengikis dan merusak lapisan pelindung yang baru saja terbentuk, rusaknya lapisan pelindung tersebut akan mengakibatkan serangan lebih lanjut pada logam yang lebih dalam sampai membentuk cekungan. Contoh Korosi Erosi:

1. Korosi Erosi pada sambungan pipa
2. Korosi Erosi pada washing machine

Pengendalian Korosi Erosi

Pengendalian korosi erosi dapat dilakukan dengan cara :

1. Mengurangi kecepatan aliran fluida untuk mengurangi turbulensi dan tumbukan yang berlebihan.
2. Menggunakan komponen yang halus dan rapi pengerjaannya, sehingga tempat pembentukan gelembung menjadi sesedikit mungkin
3. Penambahan inhibitor atau passivator
4. Menggunakan paduan logam yang lebih tahan korosi dan tahan erosi
5. Proteksi katodik

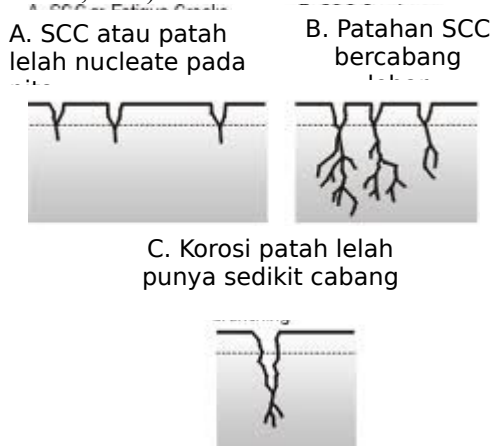
(Fontana,1986)



Gambar 2.8 Korosi Erosi (Fontana,1986)

2.6.5 Korosi retak tegang

Korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*), korosi retak lelah (*corrosion fatigue cracking*) dan korosi akibat pengaruh hidrogen (*corrosion induced hydrogen*) adalah bentuk korosi dimana material mengalami keretakan akibat pengaruh lingkungannya. Korosi retak tegang terjadi pada paduan logam yang mengalami tegangan tarik statis dilingkungan tertentu, seperti : baja tahan karat sangat rentan terhadap lingkungan klorida panas, tembaga rentan dilarutan ammonia dan baja karbon rentan terhadap nitrat. Korosi retak lelah terjadi akibat tegangan berulang dilingkungan korosif. Sedangkan korosi akibat pengaruh hidrogen terjadi karena berlangsungnya difusi hidrogen kedalam kisi paduan. (Fontana, 1986)



Gambar 2.9 Korosi SCC (sumber : <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=102>)

2.7 Korosi Pipa Baja Dalam Tanah (Soil Corrosion)

Tanah merupakan salah satu factor lingkungan yang menyebabkan terjadinya korosi. Korosi pada tanah merupakan hal yang penting, terutama untuk struktur yang dipendam dalam waktu yang cukup lama. Dengan demikian digunakan metode proteksi terhadap lingkungan akibat korosi tersebut. Contoh dari



korosi pada tanah yang berhubungan dengan minyak, gas, pipa saluran air, *buried storage tank* (umumnya pada pangkalan gas), kabel listrik untuk komunikasi, system jangkar maupun casing sumur. Sistem-sistem tersebut diharapkan dapat beroperasi secara kontinu dalam waktu yang lama sehingga harus dilindungi dari korosi tanah. (Ahmad Zaki, 2006)

Korosi pada tanah merupakan fenomena yang kompleks, dengan berbagai *variable* yang saling terkait. Reaksi kimia yang terjadi melibatkan hamper setiap elemen yang berada pada tanah tersebut, dan banyak diantaranya yang belum diketahui secara tuntas. Variasi sifat dan karakteristik tanah merupakan factor utama penyebab korosi pada struktur yang terpendam. Beberapa factor yang dapat mempengaruhi laju korosi pada tanah antara lain, resistivitas tanah, keasaman (pH), kelembaban (*moisture content*) kelarutan garam, aerasi (kandungan oksigen), kadar sulfat, kadar klorida, maupun aktivitas mikrobiologi. (Ahmad Zaki, 2006)

Mekanisme korosi baja dalam tanah adalah sama seperti pada kondisi basah, yaitu elektrokimia. Reaksi korosi terjadi karena adanya daerah-daerah anodic dan katodik dipermukaan logam yang membentuk korosi. Faktor yang mempengaruhi proses korosi baja dalam tanah terutama adalah sifat fisik dan kimia dari tanah. Beberapa factor penting tersebut diantaranya:

1. Air

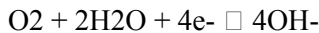
Air dalam larutan dapat bertindak sebagai elektrolit yang dibutuhkan dalam reaksi elektrokimia korosi, dan dibedakan antaranya air yang mengalir dalam tanah saturated or unsaturated. Air mengalir dari daerah tanah basah ke daerah tanah kering. Saturated water mengalir berdasarkan ukuran dan distribusi pori, tekstur, struktur dan organic. Aliran air dalam tanah dapat terjadi karena pengaruh: gravitasi, kapilaritas, tekanan osmosis, interaksi elektrostatik Antara air dan partikel tanah. Kapasitas kandungan air dalam tanah didasarkan pada struktur tanah. Pasir kasar kandungan airnya sangat kecil, tanah liat kandungan airnya sangat besar.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



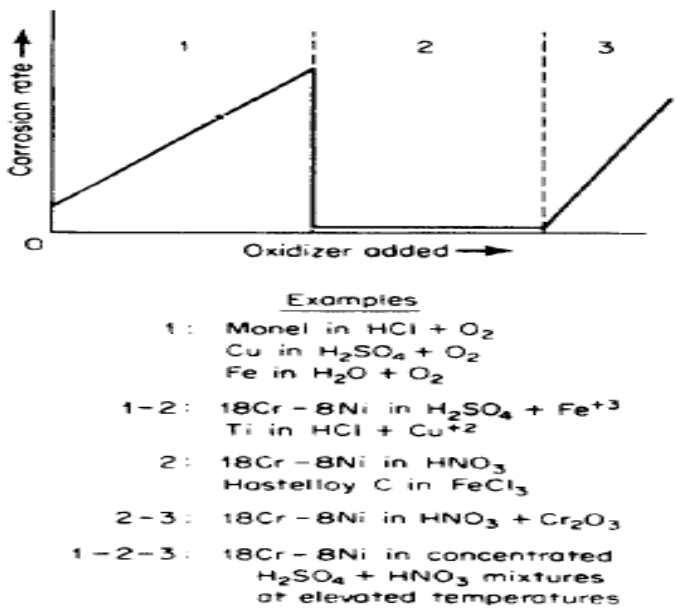
2. Kandungan Oksigen

Konsentrasi oksigen akan semakin menurun terhadap kedalaman tanah. Pada tanah metral, konstrasi oksigen sangat berpengaruh terhadap laju korosi sehubungan dengan peranannya dalam reaksi katodik, oksigen berperan dalam reaksi reduksi untuk menghasilkan ion-ion hidroksil dengan reaksi sebagai berikut:



Ion-ion akan berinteraksi dengan ion-ion logam sehingga semakin banyak pula ion-ion logam yang teroksidasi dalam proses korosi. Dengan adanya bakteri pereduksi sulfat (Sulfate Reducing Bacteria), laju korosi dapat berlangsung lebih cepat walaupun dalam keadaan anaerobik. Transpor oksigen dapat berlangsung lebih cepat dalam tanah dengan tekstur coarse (kasar), tanah kering, tekstur waterlogged. Penggalian dapat menaikkan kandungan udara dalam tanah, dibandingkan dengan tanah tanpa gangguan. Laju korosi dalam tanah yang digali mempunyai kandungan oksigen yang tinggi sehingga korosi dapat terjadi lebih cepat daripada tanah tanpa gangguan.

Efek dari oxidizers pada laju korosi dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.10 Laju Korosi pada penambahan Oxidizer

Gambar diatas dibagi menjadi tiga bagian. Perilaku pada bagian pertama, merupakan karkateristik logam pada umumnya dan juga dalam kondisi aktif. Pasif dapat terjadi jika jumlah oxidizer dalam medium cukup. Pada grafik 1, laju korosi akan meningkat saat konsentrasi oksigen juga ditingkatkan. Hal ini terjadi pada monel dan tembaga dalam larutan asam yang mengandung oksigen. Kedua logam ini tidak dapat di pasifkan. Pada besi, bisa dipasifkan dengan kelarutan oksigen dalam air terbatas.

Jika aktif-pasif logam membentuk pasif pada suatu medium, penambahan agen oksidasi tidak akan menimbulkan efek pada laju korosi. Kondisi ini biasanya terjadi pada aktif-pasif logam diimerse dalam medium asam nitrat ataupun besi klorida. Perilaku ini tampak pada grafik bagian 2, dan 3 merupakan hasil dari ketika logam pada kondisi pasif, terkena oxidizer yang sangat

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



kuat dan membuat transisi ke daerah transpasif. Hal ini dapat terjadi pada stainless steel pada medium korosi yang ditambahkan kromat. Dari penjelasan diatas, efek penamabahan oksidizer ataupun keberadaan oksigen dalam laku korosi tergantung pada mediu dan logam itu sendiri. Laju korosi mungkin meningkat saat penambahan oxidizer, oxidizer mungkin dapat memberi efek tidak berarti, ataupun pengamatan pada perilaku kompleks (Fontana Mars,1986).

Adanya oksigen yang terlarut akan menyebabkan korosi pada metal seperti laju korosi pada mild stell alloys akan bertambah dengan meningkatnya kandungan oksigen. Kelarutan oksigen dalam air merupakan fungsi dari tekanan, temperatur dan kandungan klorida. Untuk tekanan 1 atm dan temperatur kamar, kelarutan oksigen adalah 10 ppm dan kelarutannya akan berkurang dengan bertambahnya temperatur dan konsentrasi garam. Sedangkan kandungan oksigen dalam kandungan minyak-air yang dapat menghambat timbulnya korosi adalah 0,05 ppm atau kurang. Reaksi korosi secara umum pada besi karena adanya kelarutan oksigen adalah sebagai berikut :



2.7.1 Tekstur dan Struktur Tanah

Tanah merupakan kumpulan mineral, bahan organik, air, dan gas (udara). Tanah terbentuk dengan kombinasi proses terjadinya cuaca (angin, air) maupun pembusukan organik. Contohnya, humus memiliki kandungan bahan organik yang sangat tinggi. Sedangkan pasir pantai tidak mengandung bahan organik. Variasi sifat dan karakteristik tanah dapat mempengaruhi terjadinya korosi pada sebuah struktur.

Tanah dibedakan berdasarkan komposisi dan interaksi terhadap beberapa faktor terhadap lingkungan. Tanah pada umumnya diklasifikasikan tergantung dari range ukuran partikelnya, yaitu jenis pasir (*sand*), lumpur (*silt*), dan tanah liat (*clay*). Partikel berukuran antara 0.07 hingga 2 mm



merupakan jenis pasir, lumpur mempunyai range 0.005 mm hingga 0.07, sedangkan tanah liat mempunyai range diameter 0.005 mm hingga berukuran koloid. Perbandingan ukuran antara ketiga jenis partikel tersebut akan menentukan perbedaan sifat tanah.

Tabel 2.2 Ukuran Partikel pada Tekstur Tanah

Kategori	Diameter (mm)
Sand (very coarse)	1.00-2.00
Sand (coarse)	0,5-1.00
Sand (medium)	0.25-0.5
Sand (fine)	0.1-0.25
Sand (very Fine)	0.05-0.1
Silt	0.002-0.05
Clay	<0.002

Tekstur tanah merupakan distribusi partikel mineral dalam tanah tersebut. Tanah dengan kadar pasir yang tinggi memiliki kandungan air yang sedikit, sedangkan tanah liat mengandung banyak air. Saat ini tanah diklasifikasikan secara global, dapat digunakan pada banyak lokasi. Pada klasifikasi ini, tanah dipertimbangkan sebagai suatu individu tiga dimensi yang dapat disamakan terhadap sifat fisik, kimia, dan mineralogi

2.7.2 Resistivitas

Resistivitas telah digunakan sebagai indikator utama terhadap korosi pada tanah. Saat transfer ion bereaksi dengan korosi pada tanah, resistivitas tanah yang tinggi akan memperlambat reaksi korosi. Resistivitas tanah berkurang dengan meningkatnya kandungan air dan konsentrasi ion. Resistivitas tanah memiliki pengaruh yang kuat terhadap laju korosi.

Tingkat kekerasan korosi pada tanah berdasarkan resistivitas tanah dapat dilihat pada tabel berikut



Tabel 2.3 Pengaruh Resistivitas Tanah terhadap Laju Korosifitas

Soil Resistivity (Ohm cm)	Corrosivity Rating
>20.000	Essentially non-Corrosive
10.000-20.000	Mildly Corrosive
5.000-10.000	Moderately Corrosive
3.000-5.000	Corrosive
1.000-3.000	Highly Corrosive
<1.000	Extremely Corrosive

Pada umumnya, resistivitas tinggi (diukur dalam ohm-cm) akan menunjukkan laju korosi yang rendah. Resistivitas tanah meningkat dari beberapa faktor, contohnya tanah dengan partikel halus memiliki resistivitas rendah sehingga memudahkan terjadinya reaksi korosi.¹ Namun resistivitas tanah bukan satu-satunya parameter yang menyebabkan kerusakan korosi. Resistivitas tanah yang tinggi tidak menjamin keberadaan korosi

Konduktivitas tanah merupakan hal yang penting sebagai bukti mekanisme elektrokimia yang dapat digunakan untuk kontrol laju korosi. Konduktivitas yang tinggi akan mengakibatkan laju korosi yang tinggi. Konduktivitas tanah merupakan hal penting untuk stray-current corrosion

Keasaman tanah menjadi bagian dari terbentuknya asam karbonat dari karbon dioksida akibat aktivitas biologi dan air. Selain itu, keasaman tanah juga disebabkan oleh perubahan cuaca, jenis mineral tanah, hilangnya kebasahan atau elemen asli akibat leaching, terbentuknya keasaman organik dan inorganik akibat aktivitas mikrobiologi, pengeluaran akar, polusi terhadap tanah khususnya limbah industri.

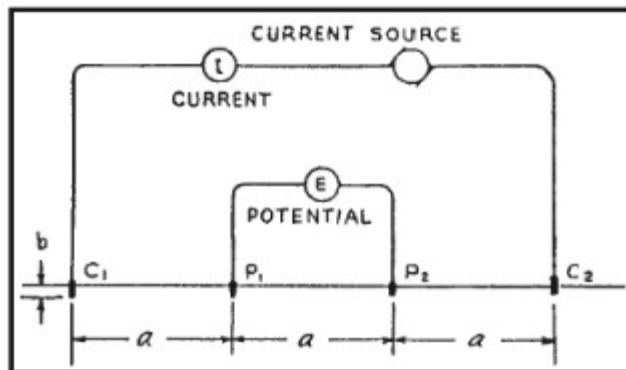
2.7.2.1 Uji Resistivitas Tanah



Tingkat korosifitas dapat ditentukan dengan mengetahui nilai resistivitas dari tanah tersebut. Satuan yang dipakai untuk nilai resistivitas tanah adalah ohm- cm. Resistivitas dari suatu tanah secara numerik adalah nilai tahanan dari tanah berbentuk kubus dengan dimensi 1 cm. Resistivitas tanah dapat diukur dengan teknik Wenner four-pin technique atau dengan pengukuran elektromagnetik. Selain itu pengukuran resistivitas tanah juga dapat dilakukan dengan metode soil box dimana sampel diambil selama penggalian.

Detil operasi dari metode 4 terminal ini sangat beragam tergantung peralatan pengukur yang digunakan tetapi prinsip pengukurannya sama. Nilai tahanan tanah diukur antara 2 elektroda terdalam, sedangkan 2 elektroda terluar berfungsi sebagai penghantar arus kedalam tanah. Nilai tahanan yang didapat merupakan nilai rata-rata terhadap kedalaman tanah dimana sama dengan jarak antar elektroda. Pada umumnya dengan semakin dalamnya tanah, harga tahanan tanah akan mengalami penurunan.

Untuk mengukur resistivitas dari sampel tanah yang banyak/luas serta pada kedalaman tertentu, yang umum digunakan adalah metode Wenner dengan menggunakan 4 terminal. Dimana nilai resistivitas dari kedalaman tanah kurang lebih sama dengan jarak antar elektroda.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Gambar 2.11 Sirkuit dasar metode Wenner, jarak (b), kedalaman elektroda harus lebih kecil dibandingkan (a).

Persamaan Wenner :

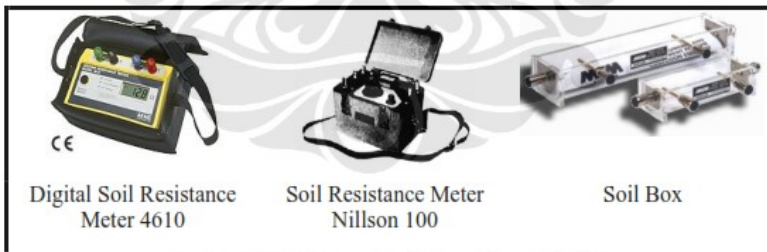
$$\rho = 2 \pi AR \quad (2.7)$$

Keterangan :

R = tahanan tanah yang terbaca pada layar pengukuran

A = jarak antar pin (cm)

ρ = esistivitas tanah (Ωcm)



Gambar 2.12 Beberapa Jenis Pengukuran Resistivitas Tanah

2.7.3 Kelembaban Tanah

Air merupakan elektrolit yang memicu reaksi elektrokimia sehingga menyebabkan korosi. Perbedaan tersebut disebabkan oleh aliran air jenuh dan tidak jenuh pada tanah yang berhubungan dengan pergerakan air dari daerah yang basah menuju daerah yang kering. Kejenuhan air tergantung dari ukuran dan distribusi pori, tekstur, struktur, dan bahan organik.

Korosi pada tanah atau soil corrosion adalah jenis korosi aqueous dengan mekanisme elektrokimia. Namun kondisi pada tanah dapat menggeser atmosferik menjadi keadaan immersed tergantung dari kepadatan tanah dan kadar kristal air (moisture content). Walaupun mekanismenya merupakan elektrokimia, banyak karakteristik tanah yang akan meningkatkan korosifitas seperti hujan, iklim maupun reaksi pada tanah tersebut.



Pada tanah, air dibutuhkan untuk ionisasi untuk oksidasi pada permukaan logam. Air juga dibutuhkan untuk ionisasi elektrolit tanah, untuk melengkapi sirkulasi aliran arus pada aktivitas korosi. Dengan demikian, air mempunyai pengaruh dalam terjadinya korosi pada tanah.

Kelembaban tanah sangat penting terhadap mekanisme korosi, contohnya tanah yang mengandung pasir kering akan lebih tahan korosi dibandingkan tanah yang mengandung tanah liat basah. Tipe Kelembaban tanah antara lain :

1. Free ground water

Air berada pada kedalaman tertentu, bervariasi dari beberapa meter hingga ratusan meter tergantung pembentukan geologi. Hanya sebagian kecil logam yang digunakan pada kondisi bawah tanah (underground) digunakan pada kondisi lingkungan air. Korosi pada kondisi ini adalah korosi lingkungan aqueous.

2. Gravitational water

Air masuk ke dalam tanah melalui permukaan dari hujan atau sumber lain bergerak ke bawah. Air gravitasi ini akan mengalir dengan kecepatan tertentu dipengaruhi struktur fisik meliputi pori-pori tanah pada berbagai daerah. Pada umumnya, air gravitasi ini tersaring dengan cepat hingga ke tingkat air tanah permanen.

3. Capillary water

Kebanyakan tanah terdiri dari beberapa jumlah air pada ruang kapiler pada partikel lumpur dan tanah liat. Jumlah aktual air tersebut dipengaruhi jenis tanah dan kondisi cuaca. Kelembaban kapiler tersebut merupakan penyimpanan air pada tanah yang akan di kirim kepada binatang maupun tumbuhan yang hidup di alamnya.

Pergerakan air dalam tanah dapat di ukur dengan mekanisme gravitasi, aksi kapilaritas, tekanan osmosis, dan interaksi elektrostatis dengan partikel tanah. Kapasitas pengikatan kelembaban dari tanah (Moisture-holding capacity) adalah kemampuan tanah untuk mengikat air yang ada dalam

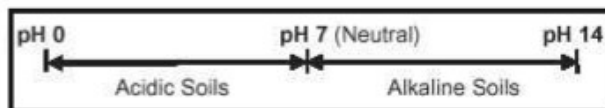
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

bentuk air kapiler. Kapasitas pengikatan air pada tanah sangat dipengaruhi oleh tekstur tanah. Tanah jenis pasir yang kasar akan mengandung sedikit air, sedangkan tanah jenis tanah liat yang halus akan mengandung banyak air. Contohnya tanah liat memiliki moisture-holding capacity yang lebih besar dari tanah jenis pasir. Derajat korosi yang diukur pada tanah berhubungan dengan moisture-holding capacity. Namun hal ini merupakan hubungan yang kompleks sehingga digunakan untuk aplikasi prediksi.

2.7.4 Keasaman Tanah (pH)

pH adalah sebuah ukuran dari derajat konsentrasi ion hidrogen.⁴ Tanah biasanya mempunyai pH antara 5-8 sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap laju korosi. Pada range tersebut, pH umumnya bukan variable dominan yang menyebabkan kecepatan korosi. Semakin asam sifat tanah menunjukkan resiko korosi yang serius terhadap baja, besi tuang, dan zinc coating. Tingkat keasaman tanah disebabkan oleh leaching mineral, dekomposisi tumbuhan (seperti pohon jarum), limbah industri, hujan asam, dan beberapa bentuk aktivitas mikrobiologi.

Tanah yang bersifat basa cenderung memiliki sodium, potassium, magnesium dan calcium. Kedua zat terakhir cenderung membentuk endapan kalsium pada struktur sehingga bersifat protektif terhadap korosi. Besar pH dapat mempengaruhi larutnya produk korosi dan aktifitas mikrobiologi



Gambar 2.13 Korosi Logam Tanah dipengaruhi pH

pH pada tanah juga merupakan hal penting karena mengandung nutrisi seperti Nitrogen (N), Potassium (K), dan



Phosphorus (P) yang dibutuhkan tumbuhan untuk berkembang. Jika pH tanah di bawah 5,5 maka tumbuhan dapat membentuk Nitrogen dalam bentuk nitrat. Sedangkan Phosphorus terbentuk pada pH tanah antara 6 dan 7.

Klasifikasi derajat keasaman tanah (pH) adalah sebagaimana ditunjukkan pada table berikut

Tabel 2.4 Data hubungan pH Tanah dengan sifat korosif Tanah

Derajat Keasaman	pH	Sifat Korosivitas
Ekstrim	<4.5	Sangat Korosif
Sangat Kuat	4.5-5.0	Korosif
Kuat	5.0-5.5	Korosif
Medium	5.5-6.0	Neutral
Ringan	6.0-6.5	
Netral	6.5-7.3	
Basa Ringan	7.3-7.8	Tidak Korosif
Basa medium	7.8-8.4	
Basa Kuat	8.4-9.0	Korosif
Basa Sangat Kuat	>9.0	Interkristal

Sumber: BSI, 2012

Keasaman tanah menjadi bagian dari terbentuknya asam karbonat dari karbon dioksida akibat aktivitas biologi dan air. Selain itu, keasaman tanah juga disebabkan oleh perubahan akibat leaching, terbentuknya keasaman organik dan inorganik akibat aktivitas mikrobiologi, pengeluaran akar, polusi terhadap tanah khususnya limbah industry.

pH merupakan salah satu factor penting dalam mempengaruhi proses korosi yang menunjukkan konsentrasi ion hydrogen $[H^+]$ dalam air dan menghasilkan pelepasan electron oleh logam pada reaksi anodic. Pada saat pH di bawah 5, besi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



terkorosi cepat dan merata. Pada saat pH di atas 9 besi akan terptoteksi. Antara pH 5 sampai 9 korosi logam akan terjadi bila lapisan pelindung pada permukaan rusak.

Tanah alkali mengandung kandungan sodium tinggi, potassium, magnesium, dan kalsium. Dua elemen tersebut cenderung membentuk calcareous deposits (lapisan kapur) pada struktur yang tertanam, dapat memberikan perlindungan yang dapat melawan korosi.

4. Klorida

Ion klorida sangat berbahaya, sehubungan dengan keberadaannya dalam reaksi anodik pada logam. Keberadaannya cenderung menurunkan tahanan jenis tanah. Ion klorida ditemukan secara alami dalam tanah sebagai akibat dari intrusi air laut atau dapat berasal dari sumber luar seperti terlepasnya lapisan garam pada jalan raya. Konsentrasi ion klorida pada korosi tanah akan bervariasi bergantung pada keadaan tanah sebagai elektrolit, basah atau kering. Semakin tinggi konsentrasi ion Cl^- , semakin tinggi pula tingkat korosifitas tanah tersebut dan kemungkinan kerusakan lapisan perlindungan pada permukaan logam oleh ion Cl^- juga semakin besar. Ion klorida cenderung menyebabkan pecahnya lapisan pasif, dengan mekanisme ion Cl^- melakukan penetrasi melalui lapisan film pasif sehingga terbentuk lubang dan tercipta daerah anodik pada daerah lubang.

5. Sulfat

Ion SO_4^{2-} merupakan ion asam kuat dan agresif yang mempengaruhi korosifitas lingkungan. Ion sulfat mempunyai kecenderungan menyerang lapisan pelindung logam. Dibandingkan dengan efek korosi yang dihasilkan oleh klorida, pada umumnya sulfat lebih kuat sebagai penyebab korosi pada material logam, misalnya kerusakan struktur pada beton adalah sebagai akibat dari tingginya kandungan sulfat. Keberadaan sulfat yang menyebabkan resiko pada material logam telah dikonversikan pada korosi sulfida oleh bakteri pereduksi sulfat (Sulfate reducing bacteria).



2.7.5 Kelarutan Garam

Air pada tanah dianggap sebagai larutan untuk garam pada tanah menghasilkan larutan tanah. Pada daerah dengan curah hujan besar, konsentrasi garam yang terlarut semakin kecil akibat mekanisme pelarutan (leaching). Sebaliknya, tanah pada daerah gersang akan mengandung banyak garam yang dibawa ke lapisan permukaan tanah oleh pergerakan air.

Pada umumnya, kation yang biasa terdapat pada tanah adalah potassium, sodium, magnesium dan calcium. Tanah yang bersifat basa memiliki kandungan sodium dan potassium yang tinggi, sedangkan tanah kapur terutama mengandung magnesium dan calcium. Garam dari empat elemen tersebut cenderung meningkatkan korosi logam. Elemen basa yang terkandung seperti calcium, magnesium, dan sebagainya akan membentuk oksida yang tidak larut dan karbonat pada kondisi bukan asam. Endapan tak larut tersebut akan menghasilkan lapisan protektif pada permukaan logam sehingga mengurangi aktivitas korosi.

Anion pada tanah memiliki peran yang sama pentingnya dengan kation. Kegunaan anion dalam proses adalah menguraikan kation dalam konduktivitas dan sel konsentrasi juga memiliki aksi tambahan jika bereaksi dengan kation dari logam dan membentuk garam yang tidak larut. Contohnya jika logam yang dipendam adalah timbal dan terdapat anion sulfat pada tanah, maka akan terbentuk lapisan timbal sulfat yang tidak dapat larut, mengendap pada permukaan logam membentuk penghalang kehilangannya logam.

Hubungan penting lain antara garam pada tanah dan korosi adalah aktivitas biologi. Ketika tanaman tumbuh dan mikroorganisme tergantung dari kebutuhan nutrisi mineral inorganik yang akan membentuk variasi kandungan mineral pada tanah seperti sulfur dan sulfat yang berhubungan dengan aktivitas bakteri. Kandungan garam pada tanah juga dapat disebabkan oleh aktivitas manusia. Penyuburan tanaman akan memasukan banyak bahan kimia ke dalam tanah. Limbah industri seperti limbah garam akibat produksi industri minyak dan kondisi lain dapat

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



merubah larutan tanah sehingga bereaksi dengan struktur logam.

2.7.6 Hubungan Potensial, pH dan Korosi

Korosi pada logam terjadi karena memang logam secara umum tidak stabil sehingga selalu mencari tingkat energy yang lebih rendah untuk mencapai kestabilan. Salah satu petunjuk mengenai karakteristik material yang sangat diperlukan dalam rangka proteksi terhadap korosi adalah diagram pourbaix.

Pada tahun 1938, Dr. Marcel Pourbaix pertama kali memperkenalkan diagram pourbaix. Diagram ini merupakan hubungan antara potensial dan pH. Dan menunjukkan beberapa area kritis yaitu area imun, area korosi dan area pasifitas.

Area korosi adalah kondisi dengan kadar pH dan potensial tertentu akan mengalami degradasi material secara spontan. Area imun adalah area dengan perlakuan sehingga material tidak akan mengalami korosi atau imun terhadap korosi, pada area ini diharapkan proteksi katodik dapat bekerja. Kemudian terdapat area pasifitas, di area ini sebenarnya material sudah mengalami korosi yang cepat dan tercipta suatu lapisan di permukaan material yang mengisolasi material dengan lingkungan atau membuat proses korosi berhenti. Aplikasi pada area ini disebut juga sebagai proteksi anodik. Pada area ini material tidak dapat dikatakan tidak terkorosi atau imun, karena korosi tetap terjadi dengan laju yang lebih rendah.

2.7.7 Pengaruh Lingkungan Terhadap Korosi

Beberapa kemungkinan perubahan lingkungan dan pengaruhnya terhadap laju korosi sebagai dasar untuk menentukan pemecahan kasus serupa. Perubahan kondisi lingkungan yang memungkinkan adalah perubahan pada kelembaban relative, tekanan, temperature, pH, konsentrasi gas terlarut, bahan pengotor, komposisi media, bakteri media, kecepatan elektrolit, konsentrasi media dan beda potensial media.

1. Temperatur



Secara umum kenaikan temperature menyebabkan kenaikan laju korosi, biasanya tiap kenaikan 10oC laju reaksi meningkat hamper dua kali lipat. Oleh karena itu temperature harus dikendalikan serendah mungkin relative terhadap kondisi yang ada dengan system pengkondisian. (sulistijono. 1999)

Perlu dicatat bahwa penurunan temperature dibawah titik embun (dew point) menyebabkan udara menjadi jenuh uap air sehingga memungkinkan terjadinya titik embun pada permukaan logam dan terjadi korosi local. Sebaliknya tidak jarang pula pemanasan ruangan digunakan untuk mengurangi kelembaban, selama temperature tidak menjadi sebab utama korosi untuk kondisi yang ada, karena temperature bias berakibat kenaikan laju korosi. (Sulistijono. 1999)

Penambahan temperatur akan menambah laju korosi walaupun kenyataannya kelarutan oksigen berkurang dengan meningkatnya temperatur. Apabila logam pada temperatur yang tidak uniform, maka besar kemungkinan terjadi korosi. Pada lingkungan temperatur tinggi, laju korosi yang terjadi lebih tinggi dibandingkan dengan temperatur rendah, karena pada temperatur tinggi kinetika reaksi kimia akan meningkat. Gambar berikut menunjukkan pengaruh emperature terhadap laju korosi pada Fe. Semakin tinggi emperature, maka laju korosi akan semakin meningkat, namun menurunkan kelarutan oksigen. Sehingga pada suatu sistem terbuka, diatas suhu 800C, laju korosi akan mengalami penurunan karena oksigen akan keluar sedangkan pada suatu sistem tertutup, laju korosi akan terus meningkat karena adanya oksigen yang terlarut.

Kecepatan reaksi redoks akan meningkat pula pada temperatur tinggi dalam peristiwa korosi. Secara umum, semakin tinggi temperatur maka semakin cepat terjadinya korosi. Hal ini disebabkan dengan meningkatnya temperatur maka meningkat pula energi kinetik partikel sehingga kemungkinan terjadinya tumbukan efektif pada reaksi redoks semakin besar dan laju korosi pada logam semakin meningkat. Efek korosi yang disebabkan oleh pengaruh temperatur dapat dilihat pada perkakas-

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

perkakas atau mesin-mesin yang dalam pemakaiannya menimbulkan panas akibat gesekan (seperti cutting tools) atau dikenai panas secara langsung (seperti mesin kendaraan bermotor)



Gambar 2.14. Korosi pada knalpot kendaraan bermotor.

2. pH

pH memengaruhi laju korosi. Pengaruh pH terhadap korosi baja bergantung pada komposisi logam, tegangan, larutan basa kuat, reaksi korosi dalam kondisi anodic-controlled dan berlangsung dengan laju tinggi. Dalam larutan basa lemah atau netral, laju korosi dalam kondisi cathodic-controlled dan dapat memproteksi korosi. Besi hidroksida memberikan lapisan protektif pada permukaan logam. Laju korosi actual bergantung pada difusi oksigen ke permukaan logam. Korosi meningkat seiring dengan kenaikan konsentrasi oksigen, partikel abrasif dan aliran turbulen, aliran kecepatan tinggi.

Dalam lingkungan pH asam, korosi dalam kondisi anodic-controlled dan komposisi logam mempengaruhi laju korosi secara ekstensif. Kadar paduan dalam baja dan tegangan mempengaruhi kerusakan akibat korosi. Tipe asam dalam larutan menentukan pH dimana laju korosi meningkat pesat seiring dengan reaksi evolusi hydrogen. Evolusi hydrogen mulai pada pH 4 maka korosi makin cepat dengan penurunan pH. Evolusi hydrogen pada pH 4 terjadi dalam elektrolit dengan kadar asam tinggi.



Asam karbonat dalam larutan bereaksi dengan besi pada pH 6 dan evolusi gas hydrogen menghasilkan korosi yang dahsyat. Hal ini mengilustrasikan esensi pengendalian pH jika terdapat gas CO₂ dalam elektrolit.

3. Bahan pengotor dan komposisi media

Bahan pengotor di media korosif bias berupa karbondioksida (CO₂), sulfurdioksida (SO₂), sulfurtrioksida (SO₃), senyawa nitrat, asam belerang, ion-ion sulfur, ion-ion klorida, dll. Bahan pengotor bersifat mempercepat laju korosi karena menurunkan pH (menaikkan derajat keasaman) media korosif. (Sulistijono. 1999)

4. Kecepatan elektrolit

Laju korosi dipengaruhi oleh laju media korosif. Secara umum laju korosi meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan media korosif kecuali untuk beberapa kondisi media korosif yang dikontrol oleh polarisasi aktivasi (media korosi yang spesies aktifnya tinggi). (Sulistijono. 1999)

Beberapa pengaruh kecepatan pada media korosif dimana laju korosi cenderung naik untuk kenaikan kecepatan namun pada media air Fe yang mula-mula naik, akan turun secara drastis lalu stabil.

5. Pengaruh konsentrasi elektrolit

Konsentrasi media korosif berpengaruh terhadap laju korosi bergantung dari jenis media tersebut dan jenis logam yang berada di media tersebut. Seperti tampak pada gambar, kurva A bagian 2 beberapa jenis logam terkorosi dengan hebat pada konsentrasi tinggi media, sebaliknya pada kurva B bagian 2 laju korosi rendah pada konsentrasi media yang tinggi. (Sulistijono. 1999)

Semakin pekat konsentrasi HNO₃ laju korosi semakin naik sedangkan pada H₂SO₄ terjadi sebaliknya yaitu semakin pekat laju korosi semakin turun.



2.8 Konsep Pengendalian Korosi

Proses korosi adalah proses alamiah yang pasti terjadi, sebagai bagian dari proses pengrusakan material dalam siklus material. Berbagai metode yang dapat dilakukan bukan untuk menghilangkan korosi, melainkan untuk memperlambat proses korosi. Proses pengendalian korosi ini bukan merupakan metode atau langkah yang dilakukan pada masa konstruksi atau masa operasi, terlebih lagi proses pengendalian korosi adalah suatu proses terintegrasi yang menyeluruh untuk melindungi aset.

Penganggulangan masalah korosi dapat berupa hal-hal berikut:

a. Design improvement

Pengendalian korosi dimulai dari tahap desain. Meningkatkan desain untuk menghindarkan terjadinya korosi. Misalkan, mencegah terjadinya genangan maka permukaan didesain dengan kemiringan. Karena genangan atau air akan mempercepat terjadinya korosi atau modifikasi desain yang lebih jauh lagi.

b. Material selection

Pemilihan material harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan dan operasi sehingga bisa mencegah terjadinya korosi. Misalkan, bila memungkinkan menggunakan material plastik, atau menggunakan stainless steel.

c. Coating and lining

Fungsi pengecatan adalah untuk melindungi besi kontak dengan air dan udara. Cat yang mengandung timbal dan seng akan lebih melindungi besi terhadap korosi. Pengecatan harus sempurna karena jika terdapat bagian yang tidak tertutup oleh cat, maka besi di bawah cat akan terkorosi. Pagar bangunan dan jembatan biasanya dilindungi dari korosi dengan pengecatan. d. Cathodic protection Pengaplikasian sistem proteksi katodik baik sistem anoda korban maupun tanding.

d. Dibalut plastik



Plastik mencegah besi kontak dengan air dan udara. Peralatan rumah tangga biasanya dibalut plastik untuk menghindari korosi.

e. Pelapisan dengan krom (Cromium plating)

Krom memberi lapisan pelindung, sehingga besi yang dikrom akan menjadi mengkilap. Cromium plating dilakukan dengan proses elektrolisis. Krom dapat memberikan perlindungan meskipun lapisan krom tersebut ada yang rusak. Cara ini umumnya dilakukan pada kendaraan bermotor, misalnya bumper mobil.

2.15



Gambar
Pelapisan
dengan
krom

f. Pelapisan
dengan
timah (Tin
plating)

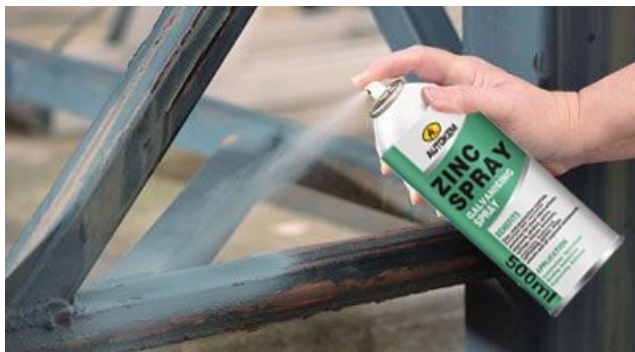
Timah termasuk logam yang tahan karat. Kaleng kemasan dari besi umumnya dilapisi dengan timah. Proses pelapisan dilakukan secara elektrolisis atau elektroplating. Lapisan timah akan melindungi besi selama lapisan itu masih utuh. Apabila terdapat goresan, maka timah justru mempercepat proses korosi karena potensial elektrode besi lebih positif dari timah.



Gambar 2.16 Pelapisan dengan Timah

g .Pelapisan dengan seng (Galvanisasi)

Seng dapat melindungi besi meskipun lapisannya ada yang rusak. Hal ini karena potensial elektrode besi lebih negative daripada seng, maka besi yang kontak dengan seng akan membentuk sel elektrokimia dengan besi sebagai katode. Sehingga seng akan mengalami oksidasi, sedangkan besi akan terlindungi.



Gambar 2.17 Pelapisan dengan Zinc



h. Anodic protection

Metode ini dikembangkan menggunakan prinsip kinetika dari elektroda. Secara sederhana, proteksi anodik bekerja berdasarkan susunan lapisan pelindung pada logam yang dihasilkan dari arus anodik yang dialirkan dari luar. Proteksi anodik mempunyai kelebihan yang unik, contohnya adalah arus yang dialirkan biasanya sebanding dengan laju korosi dari sistem yang dilindungi. Sehingga proteksi anodik tidak hanya melindungi tapi juga memberikan nilai langsung laju korosi untuk monitoring sistem. Proteksi anodik ini biasa digunakan untuk melindungi peralatan yang digunakan untuk menyimpan dan menangani asam sulfat (H_2SO_4).

Pada perlindungan dengan sistem anodik (proteksi anodik), tegangan sistem yang akan dilindungi dinaikkan sehingga memasuki daerah anodiknya. Pada kondisi ini sistem terlindungi dari korosi karena terbentuknya lapisan pasif. Syarat yang harus dipenuhi agar sistem ini berjalan dengan baik adalah bahwa karakteristik lingkungannya harus sabil. Pada jenis lingkungan yang tidak stabil (berfluktuasi), maka penerapan sistem proteksi anodik tidak dianjurkan (Rochim, 2000).

i. inhibitor

Menangkap corrosion agent dalam lingkungan, misalkan penambahan inhibitor untuk menghilangkan kandungan H_2S .

Untuk memperlambat reaksi korosi digunakan bahan kimia yang disebut corrosion inhibitor yang bekerja dengan cara membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam. Lapisan molekul pertama yang terbentuk mempunyai ikatan yang sangat kuat disebut chemisorption. Corrosion inhibitor umumnya berbentuk fluida atau cairan yang diinjeksikan pada production line. Karena inhibitor tersebut merupakan masalah yang penting dalam menangani korosi maka perlu dilakukan pemilihan inhibitor yang sesuai dengan kondisinya.

Material corrosion inhibitor terbagi 2, yaitu:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



1. Organik Inhibitor

Organik inhibitor ini adalah inhibitor yang diperoleh dari hewan dan tumbuhan yang mengandung unsur karbon dalam senyawanya. Material dasar dari organic inhibitor Antara lain:

- a. Turunnya asam lemak alifatik, yaitu: monoamine, diamine, amida, asetat, oleat, senyawa-senyawa amfoterc
- b. Imdazolines dan derivatifnya

2. Inorganik inhibitor

Inorganik inhibitor adalah inhibitor yang diperoleh dari mineral-mineral yang tidak mengandung unsur karbon dalam senyawanya. Material dasar dari inorganic inhibitor Antara lain kromat, nitrit, silikat, dan pospat.

j. Surface modification

Laju korosi pada logam dikendalikan oleh proses yang paling lambat dalam sel. Logam tidak dapat terkorosi dan menghasilkan ion-ion lebih cepat dari kecepatan katoda memanfaatkan electron yang dihasilkan, atau kecepatan elektrolit mengangkut arus melalui penghantaran ion (Trethewey, 1991)

Sifat elektrolit yang dapat dirubah untuk membatasi keganasannya terhadap permukaan logam, yaitu dengan mengubah konduktivitas elektrolit, mengubah keasaman (pH) dan mereaksikan zat kimia dengan permukaan logam untuk membentuk selaput pasif

2.9 Elektroda Referensi

Pengetahuan tentang potensial material memiliki peranan yang penting dalam menentukan kriteria proteksi. Dan penentuan potensial tersebut melibatkan elektroda referensi.

Berdasarkan standard NACE, yang dimaksud dengan elektroda referensi adalah:

"An electrode whose open-circuit potential is constant under similar conditions of measurement, which is used for measuring the relative potential of other electrodes"



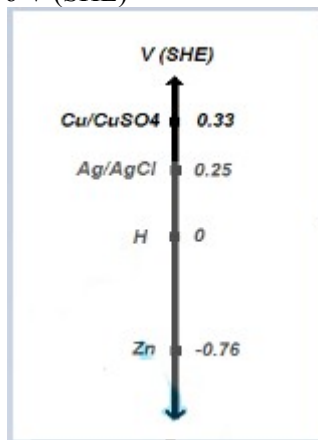
Jadi elektroda referensi adalah elektroda yang memiliki potensial saat rangkaian terbuka (potensial material itu sendiri) yang stabil sehingga digunakan untuk mengukur potensial relative antara elektroda lain terhadap referensi tersebut.

Elektroda yang sering digunakan sebagai referensi adalah:

- $\text{Cu/CuSO}_4(\text{CSE})$
- Ag/AgCl
- $\text{Hg/Hg}_2\text{Cl}_2$
- Hydrogen(SHE)
- Zn

Hydrogen digunakan sebagai standard dengan potensial 0 volt. Maka potensial elektroda referensi lain terhadap hydrogen adalah sebagai berikut:

- $\text{Cu/CuSO}_4 : 0.33 \text{ V (SHE)}$
- $\text{Ag/ Ag/AgCl} : 0.25 \text{ V (SHE)}$
- $\text{Hg/Hg}_2\text{Cl}_2 : 0.24 \text{ V (SHE)}$
- Hydrogen : 0 V
- $\text{Zn} : -0.76 \text{ V (SHE)}$



Gambar 2.18 Potensial Elektroda referensi terhadap SHE

Tiap elektroda referensi digunakan sesuai dengan aplikasi yang berbeda-beda:

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



- a. Cu/CuSO_4 umum digunakan untuk di tanah, beberapa menggunakannya di laut. CSE lebih banyak digunakan karena memiliki karakteristik sangat stabil.
 - b. Ag/AgCl umum digunakan untuk lingkungan air laut.
 - c. Hg/HgCl_2 umumnya digunakan untuk lingkungan mengandung klorida, tapi lebih merupakan untuk aplikasi laboratorium
 - d. Zn , umumnya dapat digunakan untuk aplikasi di laut
- Pemahaman akan tipe elektroda referensi diperlukan sehingga pembacaan atau pengukuran potensial dapat dilakukan seakurat mungkin

2.10 Proteksi Katodik

Proteksi katodik adalah metode untuk melindungi struktur logam dari korosi. Logam dengan struktur yang dibuat - biasanya baja - rentan terhadap korosi melalui reaksi oksidasi ketika mereka sering terjadi kontak dengan air.

Reaksi dapat melibatkan logam yang menyerah elektron dan didorong oleh jejak garam terlarut dalam air, menyebabkan air untuk bertindak sebagai elektrolit. Korosi dapat dipandang sebagai proses elektrokimia. Proteksi katodik mengubah struktur logam ke katoda – elektroda bermuatan positif – dengan mendirikan sebuah sel elektrokimia menggunakan logam yang lebih elektropositif sebagai anoda, sehingga struktur tidak kehilangan elektron ke lingkungannya.

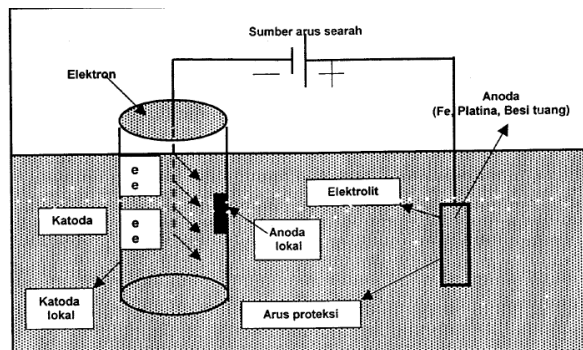
Metode perlindungan dapat digunakan pada pipa bawah tanah dan tangki; struktur bagian atas tanah, seperti tiang listrik; dan sebagian struktur terendam, seperti kapal dan rig pengeboran. Hal ini juga dapat digunakan untuk melindungi batang baja pada beton bertulang.

Logam yang lebih tahan terhadap korosi cenderung lebih mahal daripada baja dan mungkin tidak memiliki kekuatan yang diperlukan, sehingga mencegah korosi pada baja dengan melindunginya yang merupakan pilihan terbaik, meskipun logam



lain yang dapat menimbulkan korosi juga dapat dilindungi dengan cara ini.

Proteksi katodik digunakan untuk mengendalikan korosi pada permukaan logam. Proses yang dilakukan biasanya berupa reaksi elektrokimia dimana logam yang dilindungi akan bertindak sebagai katoda. Arus mengalir berasal dari anoda melalui sel elektrolit menuju ke katoda. Sehingga kemampuan proteksi terhadap katoda dapat dicapai dengan mengalirkan arus listrik tersebut.



Gambar 2.19 Proteksi Katodik (Sumber : Departemen pemukiman dan prasarana wilayah, 2004)

Baja terutama terdiri dari besi, yang memiliki potensial redoks -0,41 volt. Ini berarti bahwa itu akan cenderung kehilangan elektron di lingkungan yang memiliki potensi redoks kurang negatif, seperti air, yang mungkin bersentuhan dengan logam ini dalam bentuk hujan, kondensasi atau tanah lembab di sekitarnya. Tetesan air yang terjadi kontak dengan besi membentuk sel elektrokimia di mana besi dioksidasi oleh reaksi



Ion Besi II (Fe^{2+}) masuk ke dalam larutan dalam air, sedangkan elektron mengalir melalui logam, dan di tepi air, interaksi dari elektron, oksigen dan air menghasilkan ion hidroksida (OH^-) dengan reaksi: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$. Ion

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



hidroksida negatif bereaksi dengan ion besi II positif dalam air, membentuk larut besi II hidroksida ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), yang kemudian teroksidasi menjadi besi III oksida (Fe_2O_3), yang lebih dikenal sebagai karat.

Ada dua metode utama perlindungan katodik yang berusaha untuk mencegah korosi ini dengan menyediakan alternatif sumber elektron. Dalam perlindungan galvanik, logam dengan potensial redoks lebih negatif dari logam yang akan dilindungi terhubung ke struktur dengan kawat terisolasi, membentuk anoda. Magnesium, dengan potensial redoks dari -2,38 volt sering digunakan untuk tujuan ini – logam lainnya yang umum digunakan adalah aluminium dan seng. Prosedur ini membentuk sebuah sel listrik dengan arus yang mengalir dari anoda ke struktur, yang bertindak sebagai katoda. Anoda kehilangan elektron dan berkarat; untuk alasan ini, diketahui sebagai “anoda korban.”

Masalah dengan perlindungan katodik galvanik adalah bahwa, pada akhirnya, anoda akan berkarat ke titik di mana tidak lagi memberikan perlindungan dan perlu diganti. Sebuah sistem proteksi katodik alternatif seperti *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP). Hal ini mirip dengan metode galvanik, kecuali bahwa catu daya yang digunakan untuk menghasilkan arus listrik dari anoda ke struktur harus dilindungi. Sebuah arus searah (DC), sebagai lawan arus bolak-balik (AC), diperlukan, sehingga penyearah digunakan untuk mengkonversi AC ke DC. Metode ini memberikan perlindungan lancar yang lebih lama dengan dipasok dari luar bukannya dihasilkan oleh reaksi anoda dengan lingkungannya, sehingga umur anoda sangat meningkat. Kriteria proteksi katodik

Untuk membuat material yang akan kita proteksi bisa tidak terkorosi adalah dengan membuat potensial material minimum mencapai potensial ambang antara daerah korosi dan daerah imun dalam diagram Pourbaix.

Untuk memproteksi baja berikut adalah kriteria proteksi yang disyaratkan oleh



NACE RP 0169:

Menjadikan struktur primer berpotensi minimum -850 mV terhadap CSE saat sistem proteksi katodik diaplikasikan.

Struktur metal tersebut memiliki potensial polarisasi -850 mV terhadap CSE.

Struktur metal memiliki potensial sisa polarisasi minimum -100mV terhadap CSE

(Departemen pemukiman dan prasarana, 2004)

2.11 Proteksi Katodik Anoda Korban

Sistem ini dikenal juga dengan galvanic anode, di mana cara kerja dan sumber arus yang digunakan berasal hanya dari reaksi galvanis anoda itu sendiri. Prinsip dasar dari sistem anoda korban adalah hanya dengan cara menciptakan sel elektrokimia galvanic dimana dua logam yang berbeda dihubungkan secara elektrik dan ditanam dalam elektrolit alam (tanah atau air). Dalam sel logam yang berbeda tersebut, logam yang lebih tinggi dalam seri elektromotif-Emf series (lebih aktif) akan menjadi anodic terhadap logam yang kurang aktif dan terkonsumsi selama reaksi elektrokimia. Logam yang kurang aktif menerima proteksi katodik pada permukaannya karena adanya aliran arus melalui elektrolit dari logam yang anodic.

Sistem anoda korban secara umum digunakan untuk melindungi struktur dimana kebutuhan arus proteksinya kecil dan resistivitas tanah rendah. Di samping itu sistem ini juga digunakan untuk keperluan dan kondisi yang lebih spesifik seperti:

1. Untuk memproteksi struktur dimana sumber listrik tidak tersedia.
2. Memproteksi struktur yang kebutuhan arusnya relatif kecil, yang jika ditinjau dari segi ekonomi akan lebih menguntungkan dibandingkan dengan sistem arus tanding.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



3. Memproteksi pada daerah hot spot yang tidak dicoating, misalnya pada daerah dimana ada indikasi aktifitas korosi yang cukup tinggi.
4. Untuk mensuplemen sistem arus tanding, jika dipandang arus proteksi yang ada kurang memadai. Ini biasanya terjadi pada daerah yang resistivitas tanahnya rendah seperti daerah rawa.
5. Untuk mengurangi efek interferensi yang disebabkan oleh sistem arus tanding atau sumber arus searah lainnya.
6. Untuk memproteksi pipa yang dicoating dengan baik, sehingga kebutuhan arus proteksi relatif kecil.
7. Untuk memperoteksi sementara selama kontruksi pipa hingga sistem arus tanding terpasang.
8. Untuk memperoteksi pipa bawah laut, yang biasanya menggunakan bracelet anode dengan cara ditempelkan pada pipa yang di *coating*.

Ada beberapa keuntungan yang diperoleh jika menggunakan sistem anoda korban diantaranya:

- 1 Tidak memerlukan arus tambahan dari luar, karena arus proteksi berasal dari anodanya itu sendiri.
- 2 Pemasangan dilapangan relatif lebih sederhana.
- 3 Perawatannya mudah.
- 4 Ditinjau dari segi biaya, sistem ini lebih murah dibanding sistem arus tanding.
- 5 Kemungkinan menimbulkan efek interferensi kecil.
- 6 Kebutuhan material untuk sitem anoda korban relatif sedikit yaitu anoda, kabel dan *test box*.

Kelemahan proteksi katodik dengan anoda korban dibandingkan dengan sistem arus tanding adalah:

Driving voltage dari sistem ini relatif rendah karena arus proteksi hanya terjadi dari reaksi galvanis material itu sendiri sehingga sistem ini hanya dapat digunakan untuk memproteksi struktur yang arus proteksinya relatif kecil dan resistivitas lingkungan rendah. Karena kondisi yang demikian itu, sistem ini



akan menjadi kurang ekonomis jika dipakai untuk keperluan memproteksi struktur yang relatif besar.

Kemampuan untuk mengontrol variabel efek arus sesat terhadap struktur yang diproteksi relatif kecil. (Peabody, 2001)

2.12 Proteksi Katodik Arus Paksa

Berbeda dengan sistem anoda korban, sumber arus pada sistem arus tanding berasal dari luar, biasanya berasal dari DC dan AC yang dilengkapi dengan penyearah arus (*rectifier*), dimana kutub negatif dihubungkan ke struktur yang dilindungi dan kutub positif dihubungkan ke anoda. Arus mengalir dari anoda melalui elektrolit ke permukaan struktur, kemudian mengalir sepanjang struktur dan kembali ke *rectifier* melalui konduktor listrik. Karena struktur menerima arus dari elektrolit, maka struktur menjadi terproteksi. Keluaran (*output*) arus *rectifier* diatur untuk mengalirkan arus yang cukup sehingga dapat mencegah arus korosi yang akan meninggalkan daerah anoda pada struktur yang dilindungi. Dengan keluaran arus dari anoda ini maka anoda tersebut terkonsumsi. Untuk itu maka sebaiknya menggunakan bahan yang laju konsumsinya lebih rendah dari magnesium, zinc dan aluminium yang biasa dipakai untuk sistem tersebut, umumnya digunakan paduan kombinasi bahan yang khusus.

Sistem arus tanding digunakan untuk melindungi struktur yang besar atau yang membutuhkan arus proteksi yang lebih besar dan dipandang kurang ekonomis jika menggunakan anoda korban. Sistem ini dapat dipakai untuk melindungi struktur baik yang tidak dicoating, kondisi coating yang kurang baik maupun yang kondisi *coating*nya baik.

Kelebihan sistem arus tanding adalah dapat didesain untuk aplikasi dengan tingkat fleksibilitas yang tinggi karena mempunyai rentang kapasitas *output* arus yang luas. Artinya kebutuhan arus dapat diatur baik secara manual maupun secara otomatis dengan merubah tegangan *output* sesuai dengan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



kebutuhan. Kelebihan lain dari sistem ini, dengan hanya memasang sistem di salah satu tempat dapat memproteksi struktur yang cukup besar.

Kekurangan dari sistem ini yaitu memerlukan perawatan yang lebih banyak dibanding sistem anoda korban sehingga biaya operasional akan bertambah. Sistem ini juga mempunyai ketergantungan terhadap kehandalan pemasok energi (*rectifier*) sehingga kerusakan pada sistem ini akan berakibat fatal terhadap kinerja sistem proteksi. Kekurangan yang lain sistem arus tanding adalah cenderung lebih mahal karena peralatan dan bahan yang digunakan lebih banyak. Di samping itu ada kemungkinan dapat menimbulkan masalah efek interferensi arus terhadap struktur di sekitarnya. (Peabody,2001)

2.13 Anoda

Anoda korban harus terbuat dari logam yang mempunyai potensial listrik lebih rendah dari logam yang diproteksi (lihat tabel di bawah). Logam yang diproteksi dalam hal ini adalah tiang pancang pipa baja. Dengan demikian akan terjadi aliran elektron (*supply electron*) dari anoda ke katoda yang berlangsung secara terus menerus sampai logam anoda yang dikorbankan habis.

Anoda yang digunakan pada proteksi katodik tiang pancang pipa baja dengan metoda anoda korban biasanya digunakan logam paduan dari Magnesium, Seng, dan Alumunium sebagaimana tampak pada tabel berikut ini

Tabel 2.5 Spesifikasi Anoda (Sumber : Departemen Pemukiman dan prasarana wilayah, 2004)

Sifat	Paduan Seng*	Paduan Aluminium**	Padu
Komponen (%0	Al : 0,4 - 0,6 Cd : 0,075 - 0,0125 Cu : < 0,005	Al : Sisa Cu : 0,006 Fe : < 0,1	Al : Cu : Fe :



	Fe : < 0,0014 Tb : < 0,15 Si : < 0,125 Zn : < Sisa	Hg : 0,02 - 0,05 Si : 0,11 - 0,21 Zn : 0,3 - 0,5 Lain lain, Masing masing : < 0,02	Mg : Mn : Ni : Pb : Sn : Zn :
Kapasitas E_{Korr} (SSC)	780 Ah·kg ⁻¹ -0,1050 mv	2640 Ah·kg ⁻¹ -0,1000 mv	
Kerapatan kg·m ⁻³	7060	2695	
Kapasitas Ah·kg ⁻¹	780	2,640	
Pengausan (berat) Kg·Ay ⁻¹	10,7	3,2	
Pengausan (Volume) ml·Ay ⁻¹	1518	1180	
Keluaran Am ⁻²	6,5	6,5	
E_{kor} (SSC) mv	-1050	-1050	

* = Spesifikasi Departemen AS untuk bahan Anoda Korban Seng membutuhkan pengontrolan lebih ketat dalam hal tingkat kemurnian dari pada bahan ini.

** = Merk dagang Impalloy

*** = Merk dagang Dow Chemical Company

SSC = Ag/AgCl

Di samping sifat anoda, faktor-faktor lain juga mempengaruhi proses proteksi katodik yaitu :

1. Luas permukaan tiang yang akan diproteksi. Makin luas permukaan makin banyak anoda yang digunakan;
2. Beda potensial listrik antara anoda dan katoda. Makin besar perbedaan makin besar arus proteksi dari anoda ke katoda
3. Logam dan ukuran anoda. Makin kecil tahanan anoda berarti makin sedikit penggunaan logam anoda. Makin kecil

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



ukuran logam anoda makin besar tahanan anoda, berarti makin banyak penggunaan logam anoda. (Sumber : Departemen Pemukiman dan prasarana wilayah, 2004)

2.14 Kedalaman tanam anoda groundbed

Kedalaman tanam dari anoda groundbed menentukan pengaruh yang akan diterima struktur yang hendak diproteksi. Oleh karena itu juga berpengaruh pada interferensi yang diterima struktur yang dimaksudkan untuk tidak dilindungi pada area yang berdekatan. Terdapat tiga macam kedalaman tanam anoda groundbed, yaitu:

a. Point surface

Tipe yang mudah digunakan baik dari segi desain maupun konstruksinya. Namun sangat mudah memberikan pengaruh terhadap struktur di sekelilingnya. Meskipun demikian dapat diletakkan pada posisi optimal yang memberikan efek seminimal mungkin.

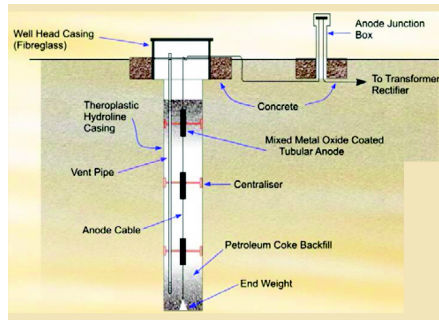
b. Distributed

Digunakan untuk memeroteksi system pemipaan pada daerah terbatas. Pada level proteksi yang sama, digunakan anoda atau catu daya yang lebih banyak. Selain itu, arus yang digunakan lebih sedikit untuk melindungi logam pada luasan yang sama.

c. Point deep well

Metode ini dapat mendistribusikan arus proteksi dengan lebih baik disbanding yang lainnya. Akan tetapi sistem ini sangat mahal, apabila memerlukan perbaikan harus diganti dengan anoda baru serta dapat merusak struktur lain di sekitarnya.

(Nace Standard RP0572-2001)



Gambar 2.20 Point Deep Well Anode Groundbed

2.15 Lapisan coating

Lapisan pelindung merupakan lapisan fil koontinyu dari material penyekat listrik di atas permukaan logam yang diproteksi. Material ini mengisolasi logam dari kontak langsung dengan elektrolit di sekelilingnya (mencegah elektrolit terhubung dengan logam) sekaligus sebagai penghalang yang memberikan hambatan listrik tinggi sehingga reaksi-reaksi elektrokimia tidak dapat terjadi. Fungsi primer lapis lindung pada pipa yang terproteksi katodik adalah mengurangi luasan permukaan logam yang terekspos pada pipa sehingga arus proteksi katodik yang diperlukan untuk melindungi logam dapat dikurang. (Peabody, 2001)

Coating adalah sebuah penutup yang diterapkan pada permukaan suatu benda, biasanya disebut sebagai substrat. Tujuan dari menerapkan lapisan seperti dekoratif, fungsional, atau keduanya. Lapisan itu sendiri mungkin lapisan all-over, benar-benar meliputi substrat, atau seperti hanya menutupi bagian substrat. Sebuah contoh dari semua jenis coating adalah label produk pada banyak minuman botol-satu sisi memiliki lapisan *all-over* fungsional (perekat) dan sisi lain memiliki satu atau lebih lapisan dekoratif dalam pola yang sesuai (printing) untuk membentuk kata-kata dan gambar. Cat dan lak adalah lapisan



yang kebanyakan memiliki kegunaan ganda untuk melindungi substrat dan menjadi dekoratif, meskipun beberapa seniman cat hanya untuk dekorasi, dan cat pada pipa industri besar diduga hanya untuk fungsi mencegah korosi. Lapisan fungsional dapat diterapkan untuk mengubah sifat permukaan substrat, seperti adhesi, wetability, ketahanan korosi, atau ketahanan aus. Dalam kasus lain, misalnya pembuatan perangkat semikonduktor (mana substrat *wafers*), lapisan menambahkan properti benar-benar baru seperti respon magnetik atau konduktivitas listrik dan merupakan bagian penting dari produk jadi. Sebuah pertimbangan utama bagi sebagian besar proses pelapisan adalah bahwa lapisan diterapkan pada ketebalan terkontrol, dan sejumlah proses yang berbeda yang di gunakan untuk mencapai kontrol ini, mulai dari sikat sederhana untuk lukisan dinding, beberapa mesin sangat mahal menerapkan pelapis di industri elektronik. Sebuah pertimbangan lebih lanjut untuk 'non-all-over' pelapis kontrol yang diperlukan ke mana lapisan diterapkan. Sejumlah non-all-over proses pelapisan ini mencetak proses. Banyak proses pelapisan industri meliputi aplikasi film tipis bahan fungsional untuk substrat, seperti kertas, kain, *film*, *foil*, atau lembar saham. Jika substrat dimulai dan berakhir proses luka di *roll*, proses dapat disebut "roll-to-roll" atau lapisan "berbasis web". Sebuah gulungan substrat, ketika luka melalui mesin coating, biasanya disebut web. (Jeff, 2014)

Menurut NACE Standards RP0169-96 Section 5, lapis lindung sebagai sarana pengendali korosi yang efektif memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Penyekat listrik yang efektif
2. Penghalang uap (kelembapan) efektif
3. Mampu diaplikasikan
4. Sejalan dengan waktu mampu menahan perkembangan *holidays*
5. Memiliki adhesi yang baik terhadap permukaan pipa



6. Mampu menahan kerusakan akibat perawatan normal, penyimpanan (degradasi sinar ultra violet), dan pemasangan
7. Sejalan dengan waktu, mampu memelihara tahanan jenis listrik secara konstan
8. Ketahanan terhadap *disbonding*
9. Mudah diperbaiki
10. Interaksi dengan lingkungan tidak menghasilkan zat beracun

2.15.1 Coating primer

Primer diterapkan langsung ke permukaan baja yang telah dibersihkan. Tujuannya adalah untuk membasahi permukaan dan untuk menyediakan adhesi yang baik untuk dilakukan coating selanjutnya. dalam kasus primer untuk permukaan baja, ini juga biasanya diperlukan untuk memberikan inhibisi korosi. (National Corrosion Service. 2000)

2.15.2 Coating Sekunder

Sebuah cat lapisan sekunder adalah lapisan pelindung tambahan yang diterapkan pada permukaan rawan korosi untuk memulihkan kegagalan potensi lapisan primer. Ini memberikan lapisan kedap air untuk kapal yang diberikan untuk mencegah pencemaran lingkungan atau tumpahan.

Adapun fungsi dari coating sistem sekunder/ intermediate, yaitu: tebal sistem coating, mempunyai ketahanan yang kuat terhadap kimia, tahan terhadap uap air, strong cohesion, strong bond to primer and topcoat. Pelapis proteksi sekunder yang sering digunakan biasa pada tangki tanah bawah tanah dan di atas yang mengandung zat-zat seperti minyak mentah, produk minyak bumi atau bahan kimia yang berbahaya bagi lingkungan ketika dirilis. (National Corrosion Service.2000)

2.16 Potensial Proteksi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

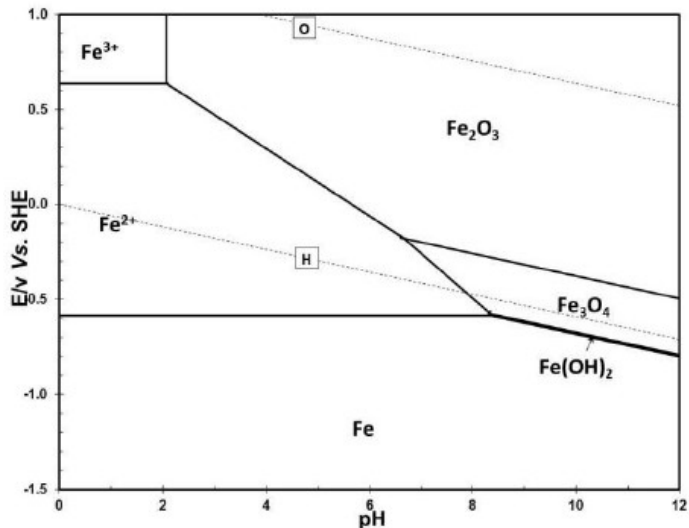


Kriteria potensial proteksi katodik -850 mV atau disebut juga on potensial sudah menjadi perdebatan bertahun – tahun antara para *engineer* dan industriawan di bidang korosi. Kriteria ini terus berubah hingga akhirnya NACE mengeluarkan *Standard Practice* NACE SP 0169 pada tahun 2007 yang mengakomodir 3 nilai *criteria* potensial proteksi katodik.

Nilai kriteria potensial proteksi katodik “*on Potential*” -850 mV diperkenalkan oleh Robert J. Kuhn pada sebuah paper tahun 1933 berdasarkan pengalamannya melakukan instalasi proteksi katodik untuk pipa air di New Orleans Amerika Serikat pada tahun 1920. Judul paper tersebut adalah “*Cathodic Protection of Underground Pipe Lines from Soil Corrosion*”. Nilai -850 mV untuk pipa air di daerah New Orleans masuk akal melihat kondisi air tanah yang berlimpah, tahanan tanah yang rendah dan kedalaman pipa yang dangkal.

Tetapi nilai potensial proteksi -850 mV ternyata tidak bisa mengakomodir proteksi katodik untuk kondisi tanah diluar New Orleans, pada tahun 1950 Kuhn menggunakan nilai -1000 mV untuk pipa gas yang dicoating di daerah Texas Amerika Serikat. Perubahan nilai *criteria* potensial proteksi katodik yang signifikan ini menjadi pertanda tidak cukupnya nilai -850 mV (on Potensial)

Penelitian mengenai *criteria* potensial proteksi juga dilakukan oleh Pourbaix pada tahun 1974 dalam jurnalnya yang berjudul “*Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*” Penelitian beliau mengenai korelasi antara pH dan nilai potensial proteksi. Berdasarkan persamaan Nerst, Pourbaix membuat grafik mengenai hubungan antara pH dan potensial proteksi katodik sebagai berikut:



Gambar 2.21 Diagram Pourbaix (sumber: Jing Ning, 2014)

Elektroda standard yang digunakan adalah elektroda hydrogen dan nilai criteria potensial proteksi minimal yang digunakan sebesar -0,59 V SHE atau jika dikonversi menjadi -0,9 V dengan elektroda Cu/CuSO₄. Nilai ini lebih negative -50 mV dari hasil eksperimen Kuhn.

Maksud dari grafik pourbaix ini adalah terdapat 3 lokasi yaitu:

1. Pada daerah A (daerah korosi dimana terjadi proses korosi pada struktur logam didaerah ini)
2. Pada daerah B (Daerah imun, atau lebih dikenal dengan proteksi katodik)
3. Pada daerah C (daerah Passivasi atau daerah proteksi anodic)

Maksud dari pourbaix mengatakan bahwa potensial proteksi minimum adalah -0,59 V SHE atau -900 mV CSE adalah membawa sebuah logam yang semula berada daerah korosi

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



(daerah A) menuju daerah *immunity* (Daerah B) sehingga proses korosi berhenti.

Untuk memudahkan pembacaan maka pourbaix menyusun sebuah tabel pada suhu 25 oC dan tekanan 1 atm untuk PH 1 sampai dengan 14 sebagai berikut:

Tabel 2.6 Tabel Pourbaix (A. Gummow, 2010)

Electrolyte pH	Oxygen Reduction Potential (V)	Potensi air (V)	Fe ₂ (V)	Bed oksigen Iron (V)
1	1.1689	-0.0591	-0.626	-1.79
2	1.1098	-0.1182	-0.62	-1.72
3	1.0507	-0.1773	-0.62	-1.67
4	0.9916	-0.2364	-0.62	-1.61
5	0.9325	-0.2955	-0.62	-1.55
6	0.8734	-0.3546	-0.62	-1.49
7	0.8143	-0.4137	-0.62	-1.43
8	0.7552	-0.4728	-0.62	-1.37
9	0.6991	-0.5319	-0.62	-1.31
10	0.6961	-0.591	-0.67	-1.30
11	0.5579	-0.6501	-0.729	-1.30
12	0.5188	-0.7092	-0.788	-1.30
13	0.4597	-7.683	-0.847	-1.30
14	0.4006	-0.8274	-1.263	-1.66

Nilai praktis terdapat pada kolom iron immunity potential dimana untuk setiap pH maka batas minimal sebuah besi masuk daerah imun adalah berdasarkan nilai potensial proteksi yang tertera di kolom tersebut pada skala SHE, Untuk mendapatkan nilai pada skala CSE harus ditambahkan -316 mV. Sebagai contoh pada pH 7 di tabel tersebut tertulis nilai -0.62 V SHE maka dikonversi menjadi -0,936 V CSE. (A. Gummow,2010)



Dikarenakan ketidak pastian pada criteria -850 mV on potential ini, maka banyak perusahaan mengaplikasikan nilai yang lebih negative dari -850 mV dengan variasi -900 mV, -950 mV bahkan sampai -1000 mV. Namun berdasarkan penelitian Brian Holtsbaum dalam sebuah jurnal yang berjudul “Use of Historical IR drops for Interpretation of “ON” Potential Criterion” pada tahun 2000 menyatakan bahwa nilai variasi tersebut tidak bisa mengakomodir nilai criteria minimal negative polarized potential proteksi berdasarkan criteria NACE point 2. (Zaki.2006)

2.17 Densitas Arus

Nilai densitas arus diperlukan untuk mempolarisasikan struktur yang dilindungi pada suatu nilai potensial perlindungan proteksi katodik. Densitas arus dalam sistem proteksi katodik arus paksa merupakan fungsi dari nilai rata-rata tahanan jenis tanah yang diukur. Selanjutnya, nilai ini akan mencerminkan sifat kekorosifan dari tanah. Tipe tanah pada akhirnya akan menentukan densitas arus yang diperlukan.

Tabel 2.7 Densitas arus terhadap tahanan jenis tanah

Tahanan Jenis Tanah (Ohm-Cm)	Tingkat Korosifitas	Densitas Arus Proteksi (mA/ m ²)
0 – 1000	Sangat korosif	20
1000 – 5000	Korosif	10
5000 – 10000	Cukup korosif	5
>10000	Kurang korosif	2

Sumber: BS 7361 : Part 1 : 1991 Cathodic Protection Code of Practice for Land and Marine Application



2.18 Overprotection

Perlindungan berlebih pada struktur baja biasanya tidak berbahaya, hanya meningkatkan laju konsumsi anoda dan penggunaan daya listrik secara percuma. Pada tingkat yang berlebih menyebabkan terjadinya coating disbondment dan hydrogen embrittlement (perapuhan hydrogen), terutama pada material High Strength Steel. (Uhlir, 1985)

1. Coating disbondment

Potensial proteksi katodik berlebih menghasilkan gas hydrogen. Mekanisme demikian disebut *hydrogen over-voltage potensial*. Proses ini terbentuk ketika potensial polarisasi mencapai -1,12 volt (instant off) terhadap electrode referensi Cu/CuSO₄. Gas yang terbentuk sering terperangkap di Antara lapis lindung dengan permukaan logam dan dapat menyebabkan *blistering* atau *disbanding* pada lapis lindung. Selanjutnya elektrolit mengisi kesenjangan Antara lapis lindung selaku penyekat listrik mengakibatkan arus proteksi tidak dapat menjangkau luasan yang terpengaruh.

2. Hydrogen embrittlement

Hydrogen juga dapat dihasilkan dari arus proteksi berlebih yang mengakibatkan menurunnya keuletan baja. Penyerapan ion-ion hidrosil oleh permukaan logam terjadi melalui proses difusi atom-atom hydrogen yang sangat kecil ke dalam Kristal lattice logam atau paduan. Ikatan antar atomnya membentuk gas hydrogen, dimana gelembung-gelembung gas ini merupakan tekanan yang dahsyat. Tekanan yang tinggi akan memutuskan ikatan antar logam untuk menghasilkan *internal voids*. Berikutnya surface blister akan menurunkan kualitas lapis lindung secara cepat (US ACE, 1997)

2.19 Diagram Pourbaix

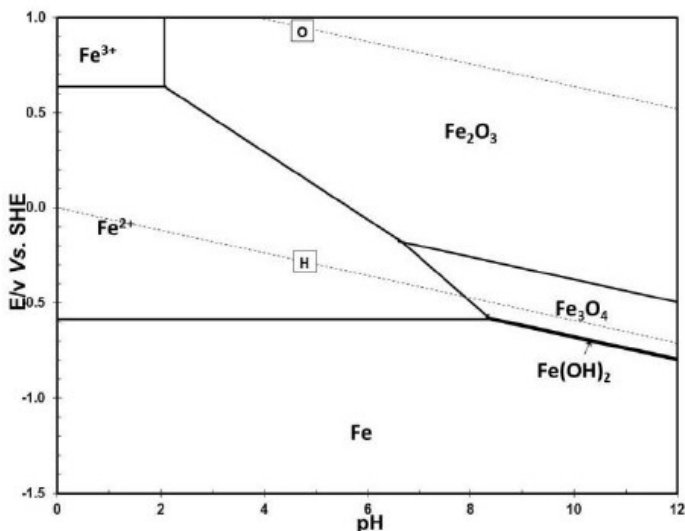
Diagram Pourbaix adalah diagram yang dapat menunjukkan suatu reaksi korosi yang terjadi secara



termodinamika, atau dapat dikenal juga dengan diagram kesetimbangan E-pH. Diagram ini disusun berdasarkan kesetimbangan termodinamika antara logam dengan air dan dapat menunjukkan kestabilan dari beberapa fasa secara termodinamika. Diagram ini sangat berguna untuk memprediksi reaksi dan produk korosi dari suatu material pada lingkungan dengan derajat keasaman tertentu. Namun, diagram ini tidak dapat menyajikan informasi untuk laju korosi dari material tersebut. Dalam suatu diagram pourbaix, keadaan suatu logam terbagi 3, yaitu:

1. Imun. Daerah dimana logam berada dalam keadaan aman dan terlindungi dari peristiwa korosi.
2. Passive. Daerah dimana logam akan membentuk suatu lapisan pasif pada permukaan dan terlindung dari peristiwa korosi.
3. Corrosion. Daerah dimana logam akan mengalami peristiwa korosi

Penelitian mengenai kriteria potensial proteksi juga dilakukan oleh Pourbaix pada tahun 1974 dalam jurnalnya yang berjudul “*Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions*” Penelitian beliau mengenai korelasi antara PH dan nilai potensial proteksi. Berdasarkan persamaan Nerst, Pourbaix membuat grafik mengenai hubungan antara pH dan potensial proteksi katodik sebagai berikut:



Gambar 2.21 Diagram Pourbaix (sumber: Jing Ning, 2014)

Elektroda standard yang digunakan adalah elektroda hydrogen dan nilai criteria potensial proteksi minimal yang digunakan sebesar -0,59 V SHE atau jika dikonversi menjadi -0,9 V dengan elektroda Cu/CuSO₄. Nilai ini lebih negative -50 mV dari hasil eksperimen Kuhn.

Maksud dari grafik pourbaix ini adalah terdapat 3 lokasi yaitu:

4. Pada daerah A (daerah korosi dimana terjadi proses korosi pada struktur logam didaerah ini)
5. Pada daerah B (Daerah imun, atau lebih dikenal dengan proteksi katodik)
6. Pada daerah C (daerah Passivasi atau daerah proteksi anodic)

Maksud dari pourbaix mengatakan bahwa potensial proteksi minimum adalah -0,59 V SHE atau -900 mV CSE adalah membawa sebuah logam yang semula berada daerah korosi



(daerah A) menuju daerah *immunity* (Daerah B) sehingga proses korosi berhenti.

Untuk memudahkan pembacaan maka pourbaix menyusun sebuah tabel pada suhu 25 oC dan tekanan 1 atm untuk PH 1 sampai dengan 14 sebagai berikut:

Tabel 2.8 Tabel Pourbaix (A. Gummow, 2010)

Electrolyt e pH	Oxygen Reduction Potential (V)	Potensial air (V)	Fe ₂ (V)
1	1.1689	-0.0591	-0.626
2	1.1098	-0.1182	-0.62
3	1.0507	-0.1773	-0.62
4	0.9916	-0.2364	-0.62
5	0.9325	-0.2955	-0.62
6	0.8734	-0.3546	-0.62
7	0.8143	-0.4137	-0.62
8	0.7552	-0.4728	-0.62
9	0.6991	-0.5319	-0.62
10	0.6961	-0.591	-0.67
11	0.5579	-0.6501	-0.729
12	0.5188	-0.7092	-0.788
13	0.4597	-7.683	-0.847
14	0.4006	-0.8274	-1.263

Tabel 2.9 Tabel Pourbaix (A. Gummow, 2010)

Electrolyt e pH	Beda oksigen dan Iron (V)	Beda Air dan besi (V)
1	-1.7949	-0.5669
2	-1.7298	-0.5018
3	-1.6707	-0.4427
4	-1.6116	-0.3836

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



5	-1.5525	-0.3245
6	-1.4934	-0.2654
7	-1.4343	-0.2063
8	-1.3752	-0.1472
9	-1.3161	-0.0881
10	-1.307	-0.079
11	-1.3069	-0.0789
12	-1.3068	-0.0788
13	-1.3067	-0.0787
14	-1.6636	-0.4356

Nilai praktis terdapat pada kolom iron immunity potential dimana untuk setiap pH maka batas minimal sebuah besi masuk daerah imun adalah berdasarkan nilai potensial proteksi yang tertera di kolom tersebut pada skala SHE, Untuk mendapatkan nilai pada skala CSE harus ditambahkan -316 mV. Sebagai contoh pada pH 7 di tabel tersebut tertulis nilai -0.62 V SHE maka dikonversi menjadi -0,936 V CSE. (A. Gummow,2010)

Dikarenakan ketidak pastian pada criteria -850 mV on potential ini, maka banyak perusahaan mengaplikasikan nilai yang lebih negative dari -850 mV dengan variasi -900 mV, -950 mV bahkan sampai -1000 mV. Namun berdasarkan penelitian Brian Holtsbaum dalam sebuah jurnal yang berjudul “Use of Historical IR drops for Interpretation of “ON” Potential Criterion” pada tahun 2000 menyatakan bahwa nilai variasi tersebut tidak bisa mengakomodir nilai criteria minimal negative polarized potential proteksi berdasarkan criteria NACE point 2. (Zaki.2006)

2.20 Parameter Desain Sistem Proteksi Katodik Anoda Korban

Tahap awal dalam desain system proteksi katodik adalah kompilasi semua data yang dibutuhkan dalam mendesain system tersebut. Berikut adalah beberapa parameter desain esensial yang



harus diketahui dan perlu didapatkan dalam mendesain system proteksi anoda korban:

- a. Dimensi struktur
Ukuran dari struktur diperlukan untuk menentukan area yang harus diproteksi. Sesuai dengan definisi dan konsep korosi dan system proteksi katodik, bagian yang akan diproteksi adalah luas permukaan struktur yang berbeda dalam elektrolit, luast permukaan akan dihitung sesuai dengan bentuk struktur tersebut.
- b. *Coating Breakdown*
Coating breakdown adalah besaran yang menunjukkan besar penurunan kualitas atau probabilitas kerusakan *coating* setelah waktu tertentu. Masing masing jenis *coating* akan memiliki besar *coating breakdown* yang berbeda-beda sesuai dengan kualitasnya. Maka tak heran untuk *coating* jenis 3 LPE akan memiliki nilai *coating breakdown* yang lebih kecil dibandingkan dengan *coating* dari coaltar karena 3 LPE memiliki kualitas yang jauh lebih baik, baik dari kekuatan fisik, kekuatan secara kimiawi terhadap lingkungan. Semakin besar nilai coating breakdown maka semakin besar kebutuhan arus, karena berarti semakin banyak dan luas daerah struktur yang tidak terlindungi oleh coating.
Sebagai informasi untuk penentuan coating breakdown dapat merujuk pada standard seperti ISO 15589 atau DNV RP B401.
- c. Umur desain
Berapa lama struktur tersebut harus diproteksi harus diketahui karena akan mempengaruhi kapasistas sistem proteksi katodik. Umumnya pipa PGN didesain untuk 20 tahun.
- d. Kebutuhan arus proteksi
Kebutuhan arus proteksi disesuaikan dengan jenis material yang akan diproteksi. Standard yang diterima



untuk pipa baja tanpa *coating* adalah sebesar 20mA/m^2 . Dengan adanya aplikasi *coating* kebutuhan arus proteksi ini akan jauh lebih berkurang.

Berikut adalah contoh kebutuhan arus yang ada dalam standar ISO 15589-1 dengan tiper *coating* dan umur desainnya

Tabel 2.10 Kebutuhan arus proteksi berdasarkan ISO 15589

Pipeline coating	Design current density mA/m^2		
	10-year design life	20-year design life	30-year design life
Asphalt/cast- <i>lar</i> enamel Cold-applied tape	0,4	0,6	0,8
Fusion-bonded epoxy Liquid epoxy	0,4	0,6	0,9
3-layer epoxy-polyethylene 3-layer epoxy-polypropylene	0,08	0,1	0,4

For a design life of more than 30 years, correspondingly greater factors should be used.

It is assumed that pipeline construction and operation is carried out in such a manner that coating damage is minimized.

For pipelines operating at elevated temperatures, the current density values shall be increased by 25 % for each 10 °C rise in operating temperature above 30 °C.

Alternative design current values may be used if reliable and properly documented.

Current density requirements also depend upon the oxygen content and resistivity of the soil.

e. Jenis anoda

Jenis anoda yang akan digunakan harus diketahui, karena pemilihan jenis anoda akan ditentukan berdasarkan kondisi lingkungan (tahanan elektrolit) dan bentuk dari struktur yang akan diproteksi

Berikut ini adalah jenis anoda yang umum digunakan untuk system proteksi anoda korban:

Paduan Mg
Paduan Al
Paduan Zn
Baja Lunak

Penggunaan anoda Mg umumnya digunakan di tanah karena *driving voltage*-nya lebih besar. Anoda paduan Al banyak



digunakan di aplikasi instalasi bawah laut. Sedang Zn biasa digunakan di daerah tahanan rendah.

komposisi kimia ini terdapat di standard internasional seperti ISO 15589 dan NACE. Ada beberapa hal prinsip yang harus diketahui tentang anoda misalnya tentang komponen aktif yang harus ada di anoda paduan Al yaitu In dan juga cara fabrikasinya.

Berikut adalah kriteria komposisi kimia untuk masing-masing anoda berdasarkan ISO 15589-1:

Tabel 2.11 Komposisi Kimia Anoda Paduan Zn

Element	Composition Mass fraction, %	
	Min	Max
Cu	-	0.005
Al	0.1	0.5
Fe	-	0.005
Cd	-	0.07
Pb	-	0.006
Zn	Sisa	
The maximum amount of other elements shall be 0.02% each		

Berikut adalah batasan maksimum tambahan unsure kimia yang dapat diberikan untuk anoda jenis Al dan Zn berdasarkan DNV RP B401:



Impurity Element	Maximum content (% weight)	
	Zn-base	Al-base
Fe	0.005	0.10
Cu	0.005	0.006
Pb	0.006	-
Si	0.12	0.15

Gambar 2.22 Maksimum konsentrasi *impurities* untuk anoda Al dan Zn berdasarkan DNV RP B401

f. Dimensi anoda

Dimensi anoda harus kita ketahui, karena untuk mengetahui besar arus keluaran anoda, komponen pentingnya adalah tahanan anoda dan dimensi digunakan untuk menghitungnya.

Dimensi anoda untuk aplikasi bawah tanah yang diperlukan adalah dimensi termasuk dengan backfill.

Untuk keperluan berat anoda, secara praktis terdapat arahan atau *rule of thumb* berdasarkan besar tahanan tanah yang dihadapi yaitu sebagai berikut:

Tabel 2.12 *rule of Thumb* pemilihan anoda

Tahanan tanah (Ohm.cm)	Berat Anoda (kg)
>1500	25
1500-2500	15
2500>	8

Terlihat dari table semakin besar tahanan tanah, maka anoda yang direkomendasikan adalah yang semakin kecil, karena dengan demikian akan didapat anoda yang lebih besar dan terdistribusi dengan baik akan memungkinkan arus keluaran yang lebih besar dan merata



- g. Efisiensi anoda
Efisiensi anoda adalah besarnya pengurangan berat anoda dibandingkan dengan besar arus dan waktu. Informasi ini adalah tentang kinerja anoda, dan darinya dapat ditentukan beberapa banyak anoda yang dibutuhkan
- h. *Utilization Factor*
Faktor kegunaan ini menunjukkan anoda dapat digunakan sampai dengan pengurangan berat berapa persen dari awal. Misalkan factor kegunaan 80% maka anoda dianggap dapat dipakai sampai dengan berkurangnya berat 80%, setelah itu harus diganti
- i. Tahanan Tanah
Tahanan tanah jelas harus diketahui saat awal kaerna menentukan jenis system proteksi katodik yang akan digunakan
- j. Kondisi di ROW (*Right of Way*), mengenai instalasi kondisi khusus
Survey di ROW ini selain menentukan daerah instalasi khusus seperti adanya *crossing* dengan sungai, jalan kereta, jalan raya atau dengan pipa lain juga penentuan survey listrik terhadap struktur di sekitar instalasi pipa. Misalkan adanya saluran tegangan tinggi. Kondisi-kondisi khusus ini perlu di ketahui karena memerlukan perlakuan yang berbeda.

2.21 Desain Perhitungan Proteksi Katodik Anoda Korban

Berikut adalah tahapan perhitungan yang harus dilakukan untuk aplikasi sistem proteksi katodik anoda korban pada pipa, adalah sebagai berikut :

- Menentukan luas permukaan struktur yang akan diproteksi

$$SA = \pi DL \dots \dots \dots (2.9)$$
 Dimana :
 SA : Luas permukaan (m²)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



D : Diameter pipa (m)

L : Panjang pipa (m)

- Menentukan kebutuhan arus proteksi

Arus kebutuhan proteksi untuk pipa baja tanpa coating yaitu 20 mA/m². Sedangkan untuk pipa dengan *coating*, rumus yang digunakan:

$$I_d = I_{bare} \cdot \text{coating breakdown} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana:

I_d : kebutuhan arus proteksi (mA/m²)

I_{bare} : kebutuhan arus proteksi pipa baja tanpa *coating* (mA/m²)

- Menentukan kebutuhan arus proteksi total

$$I_{Reg} = I_d \cdot S_a \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana:

I_{Reg} : Kebutuhan arus total (A)

I_d : Kebutuhan arus proteksi (A/m²)

- Menentukan kebutuhan total anoda

$$W = (I_{Req} \cdot t \cdot 8760) / (\eta \cdot u) \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana:

W : Berat total anoda (kg)

T : Umur Desain (tahun)

η : Efisiensi anoda (Ah/Kg.year)

u : Faktor kegunaan

- Menentukan Jumlah Anoda

$$N = W / W_{anode} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana :

N : Jumlah Anoda

W_{anode} : Berat satu Anoda (Kg)

- Menentukan lokasi pemasangan anoda

$$Spacing = L / N \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana:

L : Panjang Pipa (m)

N : Jumlah Anoda

- Menghitung Tahanan anoda :



Tahanan anoda ditentukan oleh beberapa faktor, yaitu dimensi anoda, tahanan tanah dan posisi instalasi. Anoda yang dipasang secara vertikal dan horizontal akan memiliki tahanan yang berbeda. Berikut adalah rumus untuk menghitung tahanan anoda:

Instalasi Horizontal:

$$R_h = (2\pi L \ln 4L/D) \cdot I \dots\dots\dots (2.15)$$

Instalasi Vertikal:

$$R_v = (2\pi L \ln (8L/D) \cdot I) \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana:

R_h : Tahanan anoda horizontal (Ohm)

L : Tahanan tanah di kedalaman anoda ditanam (Ohm.cm)

L : Panjang anoda termasuk backfill (cm)

D : Diameter anoda termasuk backfill (cm)

- Menghitung arus keluaran anoda

Untuk mengetahui arus keluaran anoda, maka berlaku hukum Ohm, yaitu arus adalah tegangan dibagi dengan tahananannya. Setelah diketahui tahanan anoda, maka untuk tegangannya, yang berpengaruh adalah tegangan dorong (Driving Voltage) yang merupakan selisih antara tegangan anoda dan tegangan proteksi yang dikehendaki.

Berikut Rumusnya:

$$I_{\text{Anoda}} = (E_{\text{anoda}} - E_{\text{Proteksi}}) / R_{\text{anoda}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

E_{anoda} : Potensial anoda

E_{proteksi} : Potensial proteksi

- Menghitung total arus dari jumlah anoda

$$I_{\text{anoda total}} = I_{\text{anoda}} \cdot N \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana:

N : Jumlah anoda

I_{anoda} : Arus Keluaran anoda

- Menentukan usia proteksi homogeny anoda



Setelah seluruh arus keluaran dibandingkan dengan kebutuhan arus, maka akan kita dapat perkiraan usia anoda dengan metode berikut:

$$T_{\text{anoda}} = (I_{\text{anoda total}} / I_{\text{req}}) \cdot t_{\text{design life}} \cdot U \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana:

$T_{\text{design life}}$: Umur Desain pipa

U : Faktor utilisasi (factor kegunaan anoda)

2.22 Penelitian Sebelumnya

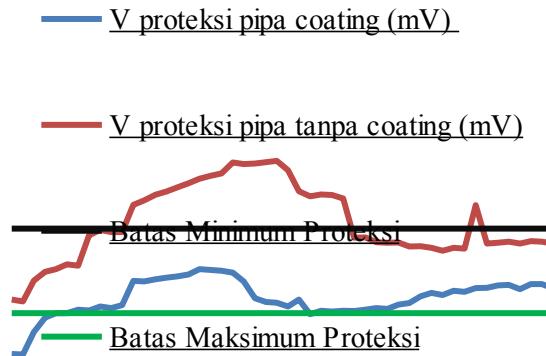
Pada Penelitian sebelumnya yang dilakukan berkaitan tentang Proteksi katodik pipa dengan sistem proteksi katodik anoda tumbal yang dilakukan oleh Sepriananda dengan tipe API 5L Grade B dalam media tanah pada tahun 2016 dalam media tanah dengan variasi coating dan non coating. Pipa yang ditanam dalam tanah harus memiliki potensial sebesar -850 sampai -1100 mv agar terhindar dari korosi eksternal. Apabila pipa yang ditanam memiliki potensial kurang dari nilai tersebut maka perlu dilakukan proteksi katodik untuk mencapai nilai tersebut. Pengukuran potensial pipa dapat diketahui dengan menggunakan elektroda referensi Cu/CuSO₄ yang dihubungkan ke kutub negatif multimeter dan test point yang dihubungkan ke kutub positif multimeter.

Pada penelitian sebelumnya, sebelum pipa diproteksi menggunakan anoda korban, dilakukan pengukuran potensial pipa ke tanah dengan menggunakan elektroda referensi. Pengukuran ini dilakukan agar mengetahui potensial pipa ke tanah atau potensial pipa sebelum dilakukan proteksi katodik.

Untuk yang coating terlihat data material lebih tinggi dari yang tidak di coating. Hal ini terjadi karena pipa dan anoda masih dalam kondisi penyesuaian dengan lingkungan. Namun seiring berjalan waktu dan pengontrolan arus yang dilakukan pipa coating dapat terus terjaga pada range proteksi. Jika dibandingkan dengan pipa coating yang mendapat proteksi yang berasal dari lapisan coating dan arus dari anoda korban sementara pipa tanpa coating hanya berasal dari arus anoda korban hal tersebut akan



sangat mempengaruhi potensial proteksi dari pipa. Dapat disimpulkan pipa coating lebih mudah dikontrol untuk terus berada di zona proteksi, sementara pada pipa tanpa coating pengontrolan arus harus lebih diperhatikan.



Gambar 2.23 Grafik Arus proteksi pipa (Sepridany, 2016)

Dapat disimpulkan juga bahwa dari hasil pengujian selama 50 hari, pipa yang dikenai coating hanya membutuhkan arus proteksi yang lebih sedikit dibandingkan dengan pipa yang tidak dikenai coating. Adanya coating pada pipa membuat pipa lebih terproteksi dan membutuhkan arus kecil kisaran 0.9 mA sampai 1.5 mA. dibandingkan dengan pipa yang tidak dikenai coating, pipa membutuhkan arus proteksi sekitar 3.6 sampai 5 mA. (Sepridany, 2016)



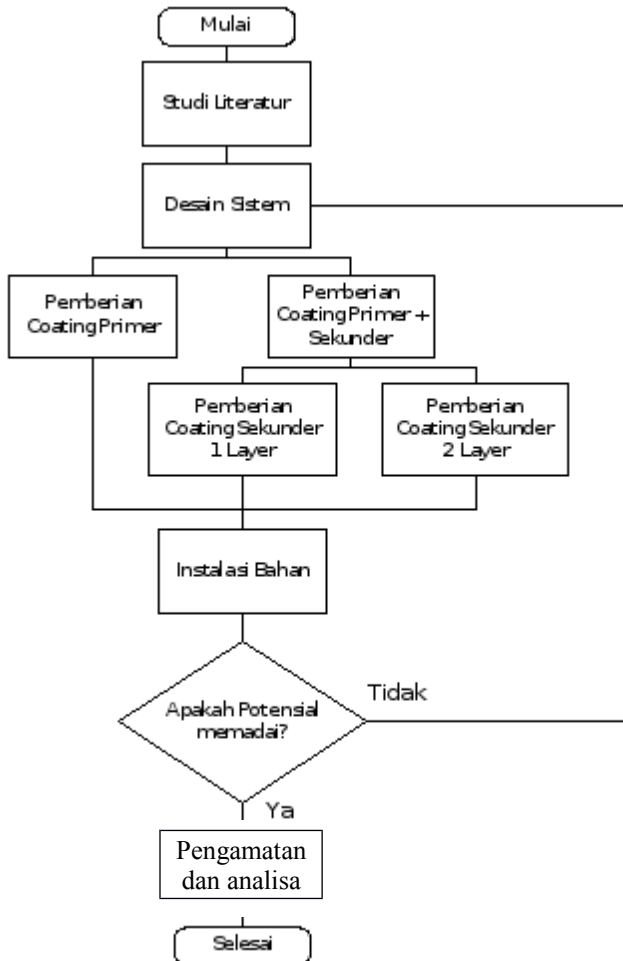
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir



3.2. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah :

- 1 Pipa Baja API 5L Grade B
- 2 Anoda Zinc
- 3 Cat pelapis
- 4 Kabel Tembaga

3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan adalah :

- 1 Alat ukur wenner
- 2 Kabel Tembaga
- 3 Multitester
- 4 Elektroda Reference

3.4 Langkah Perancangan

Langkah langkah yang dilakukan untuk mendukung perancangan tersebut antara lain,

1. Pengumpulan data
2. Melakukan kriteria desain
Kriteria desain yang akan digunakan adalah,
Umur desain: 1 tahun
Limit positif: -850 mV
Limit negatif: -1100 mV
Electrode Reference: Cu/CuSO₄
3. Standart perancangan
Desain sistem proteksi katodik anoda korban mengikuti standar:
 - 1) NACE Standard RP169-2002 *Control Of External Corrosion Of Underground or Submerged Metallic Piping System*
 - 2) NACE Standard RP-0286-97 *Electrical Isolation Of Cathodically Protected Pipelines*
 - 3) DNV-RP-B401 *Cathodic Protection Design*



-
- 4) A.W. Peabody, *Control of Pipeline Corrosion*(Second Edition),NACE International The Corrosion Society
 4. Survey resistivitas tanah
Survey dan pengukuran resistivitas tanah mengikuti standar ASTM G57 *Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four – Electrode Method*



Gambar 3.2 Pengukuran Resistivitas Tanah

5. Pengujian pH tanah
Pengujian dan pengukuran pH tanah mengikuti SOP Scientific Engineering Response and Analytical Services (SERAS) number 1844 Standart Operation Procedure pH Soil Determination.



Gambar 3.3 Pengukuran pH Tanah

6. Desain sistem proteksi katodik anoda korban
Untuk mengetahui arus dan berat anoda Maka perhitungan dimulai dengan

- 1 Luas permukaan struktur yang akan dilindungi

$$A = \pi \times D \times L \quad (3.1)$$

Dengan :

D = diameter luar pipa (m)

L = panjang pipa (m)

$\pi = 3.14$

A = luas permukaan yang diproteksi (m²)

- 2 Kebutuhan Arus Proteksi

$$I_d = I_{bare} \cdot \text{coating breakdown} \dots \dots \dots$$

(2.9)

Dimana:

I_d : kebutuhan arus proteksi (mA/m²)



Ibare: kebutuhan arus proteksi pipa baja tanpa coating (mA/m²)

- 3 Keperluan Arus DC Minimum

$$IR \geq I_o \times Sf \quad (3.8)$$

Dengan :

IR = keperluan arus DC minimum (ampere)

I_o = keperluan arus proteksi (ampere)

- 4 Berat Anoda

$$W_o = \frac{Y \times C \times IR}{U} \quad (3.9)$$

Dengan :

W_o = berat anoda (Kg)

Y = lama proteksi (tahun)

C = laju konsumsi anoda (kg/Ampere tahun)

IR = keluaran arus DC (ampere)

U = faktor guna (80%)

- 5 Jumlah Anoda yang dibutuhkan

$$n = \frac{W_o}{W} \times Sf \quad (3.10)$$

Dengan :

n = jumlah anoda

W_o = berat anoda total (Kg)

W = berat anoda standar (Kg)

Sf = safety factor (1,25)

- 6 Tahanan Anoda Tumbal

$$\frac{4L}{d} - 1 \ln i \quad (3.11)$$

$$Rh = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} i$$

Dengan :

Rh = tahanan anoda tunggal (ohm)



ρ = resistivitas tanah rata rata (ohm-m)

L = panjang anoda (m)

d = diameter anoda (m)

7 Faktor Interferensi Anoda

$$0.66 \times n$$

$$\ln i$$

$$F = 1 + \frac{\rho}{\pi \times Sa \times Rh} i \quad (3.12)$$

Dengan :

F = faktor interferensi anoda

ρ = resistifitas tanah (ohm-m)

Sa = jarak pemasangan antar anoda (m)

n = jumlah anoda

8 Tahanan Groundbed

$$Rn = \frac{Rh}{n} F$$

$$(3.13)$$

Dengan :

Rn = tahanan groundbed (ohm)

Rh = tahanan anoda individual (ohm)

n = jumlah anoda

F = faktor interferensi anoda

9 Tegangan yang diperlukan

$$Vo = IR \times (Rn \times Sf + rp) + e \quad (3.14)$$

Dengan :

Vo = tegangan yang diperlukan (volt)

IR = keluaran arus DC (ampere)

Rn = tahanan groundbed (ohm)

Sf = safety factor

Rp = tahanan karakteristik pipa (ohm)

e = tegangan dalam (volt)

7. Instalasi peralatan

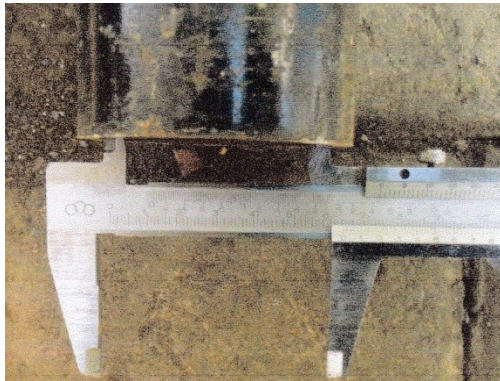
a. Preparasi Pipa

Pipa yang digunakan adalah pipa baja API 5L grade

B, pengukuran pipa digunakan agar dapat mengetahui



luas permukaan yang akan dilindungi. Dari pengukuran didapat panjang sebesar 150cm, diameter pipa sebesar 7,36 cm, dan tebal pipa sebesar 1,05 cm.



Gambar 3.4 Pengukuran diameter Dalam Pipa



Gambar 3.5 Pengukuran Diameter Luar Pipa



Gambar 3.6 Pengukuran Pipa Baja API 5L Grade B

Pipa juga dibersihkan dari pengotor yang menempel



Gambar 3.7 Pembersihan Pipa dari pengotor

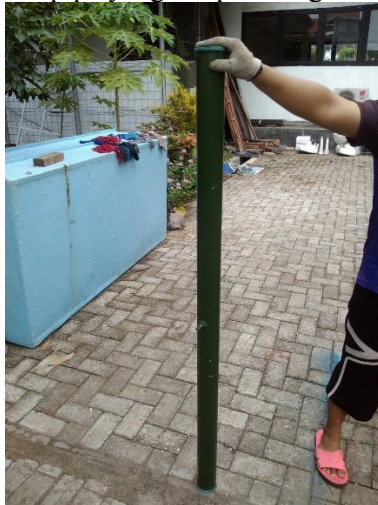
Pipa baja diberikan pengait kabel yang dilas pada permukaan kabel, agar pemasangan kabel menjadi lebih mudah.



Gambar 3.8 Pengait kabel pada pipa baja

b. Pemberian Coating

Pipa dibagi menjadi dua, pipa yang dilapisi oleh cat dasar besi dan pipa yang dilapisi dengan cat luar besi



Gambar 3.9 Pemberian coating dengan Coating Primer



Gambar 3.10 Pemberian coating dengan Coating Sekunder

- c. Penyambungan kabel ke pipa
 1. Membersihkan permukaan pipa yang akan menjadi titik penyambungan (bagian tengah pipa) dengan menggunakan amplas. Permukaan pipa harus kering dan bersih dari semua kotoran, minyak dan air.
 2. Memotong kabel jenis ukuran 4mm^2 sepanjang 3 meter sebanyak 2 buah pada masing-masing pipa.
 3. Mengikat kabel yang telah disediakan tersebut ke bagian sambungan pipa yang telah di las.
 4. Mengencangkan sambungan baut agar kabel tidak lepas



5. Menutup sambungan kabel pada pipa dengan isolasi
- d. Pemasangan anoda Zinc dalam Lubang *groundbed*
 1. menyiapkan lubang galian untuk anoda di samping lubang pipa. Jarak anoda dari pipa sekitar 50 cm ke arah samping dan 30 cm di bawah pipa. Jumlah anoda zinc untuk setiap pipa adalah 1 buah.
 2. setelah lubang siap, anoda diturunkan dan diletakkan secara vertical tegak lurus dengan posisi jalu pipa. Saat penurunan anoda harus diperhatikan agar tidak menarik anoda pada bagian kabel dan juga karung jangan sampai sobek.
 3. Membasahi anoda dengan cara menyiram air sampai basah seluruhnya.
 4. Menimbun kembali galian anoda dengan tanah asal sampai level tanah kembali pada saat semula.
8. Pengujian tegangan proteksi

Pengujian yang digunakan adalah menguji apakah tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk ke dalam area proteksi yaitu sekitar -850mV sampai dengan -1100mV dengan menggunakan elektrode Cu/CuSO₄ sebagai reference.



Gambar 3.8 Pengukuran tegangan proteksi

9. Analisa hasil
10. Evaluasi
11. Kesimpulan

Sistem proteksi katodik anoda korban pada baja API 5L di nyatakan berhasil apabila apakah tegangan sistem proteksi tersebut sudah masuk ke dalam area proteksi yang sudah di tentukan dan tidak terjadi kegagalan pada sistem proteksi tersebut.



BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perencanaan Perancangan

4.1.1 Kriteria Desain

Perancangan proteksi katodik pada desain dilakukan dengan menerapkan kriteria desain, yaitu:

- Umur Desain : 1 tahun
- Limit Positif : -850 mV
- Limit Negatif: - 1100mV

4.1.2 Standar Desain Perancangan

Standar yang digunakan pada Desain mengacu pada:

- NACE RP-B401
“Cathodic Protection Design”
- ASTM G-57
“Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner Four- Electrode Method”
- NACE RP-0177
“Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems”
- NACE RP-0169
“Standard Practice Control of External Corrosion”

4.2 Pengumpulan Data

4.2.1 Data Material

Material pipa	: Baja karbon rendah
Jenis Pipa	: Spiral pipe welding API 5L Grade B
Panjang pipa	: 1.5 meter
Diameter luar	: 0.0736 meter
Tahanan jenis baja	: 2.2×10^{-7} Ohm-m
Tebal dinding	: 0.00635 m
Kedalaman pipa dari permukaan tanah	: 0.5 m
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Baja API 5L Grade B	



C (Max)	Mn (Max)	P (Max)	S (Max)	Ti (Max)	V (Max)	Ni (Max)
0.22 %	1.20 %	0.025 %	0.015 %	0.04 %	0.15 %	0.15 %

Sumber : Specification for Line Pipe American Petroleum Institute, 2004

4.2.2 Data Tanah

Mengacu pada Standar ASTM G-57 Survei tahanan tanah merupakan langkah pertama sebelum masuk kedalam desain perancangan instrumen proteksi katodik. Pengukuran dilakukan dengan cara konvensional dengan menggunakan sumber arus (Baterai Aki), instrumen DC ampermeter dan Voltmeter.

Survei tahanan tanah dengan standar ASTM G-57 menggunakan metode yang dinamakan Wenner 4 pin yang dilakukan pada bulan April 2017.

Nilai tahanan jenis dihitung sesuai rumus berikut :

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R$$

dengan:

ρ = tahanan jenis tanah (Ohm-cm)

a = jarak antar pin (cm)

R = hambatan yang terukur (Ohm)

$$\rho = 3.14159$$

Hasil Pengukuran Pada Resistivitas Tanah dapat di lampirkan dalam Grafik Berikut:

Tabel 4.2 Resistivitas Tanah



Hari Ke	Jarak Elektroda (cm)	V (mV)	I (mA)	R(Ω)	$\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	Kondisi Tanah
1	200	24	250	0,096	120,576	Kering
2	200	22,7	230	0,098696	123,9617	Hujan
3	200	18,2	240	0,075833	95,24667	Basah
4	200	16	210	0,07619	95,69524	Kering
5	200	16,1	210	0,076667	96,29333	Basah
6	200	16,6	210	0,079048	99,28381	Kering
7	200	13,8	200	0,069	86,664	Cerah
8	200	19	210	0,090476	113,6381	Hujan
9	200	22,4	250	0,0896	112,5376	Basah
10	200	23,2	250	0,0928	116,5568	Basah
11	200	23,6	280	0,084286	105,8629	Basah
12	200	15,7	260	0,060385	75,84308	Kering
13	200	12,1	280	0,043214	54,27714	Kering
14	200	12	200	0,06	75,36	Kering
15	200	9,4	210	0,044762	56,22095	Kering
16	200	12,5	210	0,059524	74,7619	Kering
17	200	14,2	210	0,067619	84,92952	Kering
18	200	15,7	220	0,071364	89,63273	Kering
19	200	18	230	0,078261	98,29565	Basah
20	200	16	240	0,066667	83,73333	Kering
21	200	23	390	0,058974	74,07179	Kering
22	200	23	330	0,069697	87,53939	Kering
23	200	24	340	0,070588	88,65882	Kering
24	200	25	310	0,080645	101,2903	Basah
25	200	20	310	0,064516	81,03226	Kering
26	200	22	310	0,070968	89,13548	Basah
27	200	19	300	0,063333	79,54667	Kering

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



28	200	20	310	0,064516	81,03226	Kering
Rata-Rata					90,77419	

Tabel 4.3 Perbandingan Resistivitas tanah pada Kondisi Tanah
Kering dan Basah

Nomor	Kondisi Kering (Ohm.cm)	Kondisi Basah (Ohm.cm)
1	120,576	123,9617
2	81,03226	95,24667
3	79,54667	96,29333
4	81,03226	113,6381
5	95,69524	112,5376
6	99,28381	54,27714
7	86,664	75,84308
8	105,8629	98,29565
9	116,5568	75,36
10	101,2903	89,13548
11	84,92952	56,22095
12	89,63273	
13	83,73333	
14	74,07179	
15	87,53939	
16	88,65882	
Rata Rata	92,25661	90,07361

Pada Kondisi Tanah yang ada terlihat bahwa Nilai Resistivitas tanah berada paling tinggi pada kondisi Kering sedangkan dengan kondisi Basah nilai kondisi tanah Menurun menyebabkan nilai resistivitas menurun

Dilihat dari tabel 2. Dapat disimpulkan bahwa tanah sebagai media yang digunakan tanah berada dalam kategori . Dengan rata rata 90,77419. Aliran elektron pada daerah ini

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



bergerak secara kontiniu dan tidak terhalang. Artinya bahwa hal ini sangat membahayakan pada pipa karena rentan terhadap korosi. Faktor resistivitas tanah mempengaruhi jenis penggunaan anoda yang akan digunakan sebagai pelindung dalam perhitungan desain sistem di karenakan penggunaan anoda pada kondisi tanah yang berbeda dapat menyebabkan tidak efisiensinya penggunaan anoda. Pengaruh ketika pipa tertanam perubahan resistivitas tanah yang fluktuatif mempengaruhi nilai kebutuhan arus anoda yang dikeluarkan untuk melindungi pipa

Selain dari faktor resistivitas tanah yang mempengaruhi sifat korosifitas suatu tanah, pH tanah juga merupakan faktor yang dapat mempengaruhi sifat korosifitas suatu tanah. Pada tanah terjadi reaksi asam maupun basa yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion H^+ dan ion OH^- . Dalam desain ini juga mempertimbangkan nilai dari pH tanah.

Tabel 4.3 Data pH

Hari ke	pH
1	8,4
2	8,3
3	7,9
4	8,2
5	8,2
6	8,4
7	8,2
8	8,5
9	8,4
10	8,1
11	8
12	8,1
13	8,3
14	8,4



15	8,2
16	8,4
17	8,3
18	8,4
19	8
20	7,8
21	7,9
22	8,2
23	8
24	8,3
25	8,3
26	8,2
27	8,4
28	8,3
29	8,4
30	8,4

Dalam pengamatan yang di lakukan untuk mendapatkan kondisi pH tanah pada daerah pipa yang ditanam. Dapat disimpulkan bahwa tanah pada daerah pipa berada pada kondisi basa dimana rata rata pH tanah berada pada 8,23. Kondisi sekitar tanah merupakan lokasi rawa dan dekat dengan permukaan laut yang menyebabkan tanah tersebut merupakan basa. Pengaruh sifat basa dalam korosi dapat di jelaskan dengan diagram pourbaix dimana pipa baja API 5L dapat terkorosi jika berada dalam keadaan basa.

4.2.3 Perhitungan Desain

Perhitungan desain dilakukan untuk mendapatkan nilai yang diharapkan dalam pengujian sistem proteksi sehingga ketika dalam perancangan pipa berhasil terproteksi sesuai nilai standar

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



Luas permukaan struktur yang akan dilindungi dengan menggunakan **Rumus 2.9** didapat sebesar $= 0.346656 \text{ m}^2$

1. Kebutuhan Arus Proteksi

Arus yang dibutuhkan pipa untuk perlindungan terhadap korosi harus diperhitungkan. Kekurangan arus dalam proses perlindungan dapat mengakibatkan kerusakan pada coating apabila menggunakannya. Sedangkan apabila tidak menggunakan korosi akan langsung menyerang pipa. Perhitungan keperluan arus proteksi dapat dilakukan setelah mendapatkan luas permukaan pipa. Persamaan keperluan arus proteksi yaitu

$$I = A \times CD \times CB$$

Pipa yang di coating primer

$$SI = A \times CD \times CB \times SF$$

$$I = 0.346656 \times 20 \times 0.6 \times 1,25$$

$$I = 5.19984 \text{ mA}$$

$$I = 0.00519984 \text{ A}$$

Pipa yang di coating primer dan sekunder 1 lapis

$$I = A \times CD \times CB \times SF$$

$$I = 0.346656 \times 20 \times 0.2 \times 1,25$$

$$I = 1.73328 \text{ mA}$$

$$I = 0.00173328 \text{ A}$$

Pipa yang di coating primer dan sekunder 2 lapis

$$I = A \times CD \times CB \times SF$$

$$I = 0.346656 \times 20 \times 0.095 \times 1,25$$

$$I = 0.823308 \text{ mA}$$

$$I = 0.000823308 \text{ A}$$

Dalam sistem proteksi katodik anoda korban, densitas arus merupakan fungsi dari nilai tahanan jenis tanah rata-rata hasil pengukuran. Nilai tersebut disesuaikan dengan tingkat kekorosifan tanah yang dilalui pipa. Selanjutnya tipe tanah ini yang akan menentukan densitas arus yang dibutuhkan untuk mempolarisasikan pipa pada suatu nilai potensial perlindungan.

Faktor keamanan turut dilibatkan dalam perhitungan untuk memberikan penyesuaian terhadap penambahan luas permukaan karena adanya suaian (*fitting*), lengkungan (*bending*)



dan lain sebagainya.

Dalam perencanaan, lapis lindung diasumsikan mengalami penurunan kualitas selama masa pakainya. Pada kasus ini, tingkat kerusakannya sepuluh persen per tahun.

1. Pipa yang di Coating Primer

$$W = \frac{I \times T \times 8760}{K \times u}$$

$$W = \frac{0.00519984 A \times 1 \text{ tahun} \times 8760 h/\text{tahun}}{780 Ah/kg \times 0.8}$$

$$W = 0.73 \text{ kg} = 730 \text{ gram}$$

2. Pipa yang di coating dengan primer dan sekunder 1 lapis

$$W = \frac{I \times T \times 8760}{K \times u}$$

$$W = \frac{0.00173328 A \times 10 \text{ tahun} \times \frac{8760 h}{\text{tahun}}}{\frac{780 Ah}{kg} \times 0.8}$$

$$W = 0.24 \text{ kg} = 240 \text{ gram}$$

3. Pipa yang di coating dengan primer dan sekunder 2 lapis

$$W = \frac{I \times T \times 8760}{K \times u}$$

$$W = \frac{0.000823308 A \times 10 \text{ tahun} \times \frac{8760 h}{\text{tahun}}}{\frac{780 Ah}{kg} \times 0.8}$$

$$W = 0.11 \text{ kg} = 110 \text{ gram}$$



Berat total anoda yang dibutuhkan adalah kurang dari 730 gram. Sementara produk anoda yang tersedia di pasaran mempunyai berat minimal sebesar 2 kg. Jadi hanya dibutuhkan 1 anoda masing- masing pipa.

4.2.3.1 menghitung resistansi groundbed anoda

Berdasarkan Dwight's Formula, untuk anoda tunggal yang dipakai dalam proteksi katodik dengan posisi vertikal, rumusnya adalah sebagai berikut:

$$R = \frac{0.00521 \rho}{L} \ln \frac{8L}{d} - 1$$

Dimana

R = Resistansi (ohm)

L = panjang anoda (cm)

d = diameter anoda (cm)

ρ = resistivity tanah (ohm-cm)

untuk Anoda kotak:

$$R = \frac{\rho}{a+b}$$

Dimana

a= panjang anoda(cm)

b= lebar anoda (cm)

Anoda yang dipakai pada penelitian kali ini memiliki dimensi sebagai berikut:

panjang anoda = 15 cm

lebar anoda = 7.5 cm

tinggi anoda = 3cm

Sehingga resistansi anoda ini adalah

$$R = \frac{\rho}{a+b} \quad R = \frac{500 \text{ ohm.cm}}{(15+7.5) \text{ cm}} \quad R = \frac{500 \text{ ohm.cm}}{(22.5) \text{ cm}}$$

R= 22.22 ohm

4.2.3.2 Arus Keluaran Anoda



Untuk menghitung arus keluaran anoda, dapat dihitung dengan membagikan driving voltage dengan resistensi anoda tersebut

$$I = \frac{Pa - Pc}{R}$$

$$I = \frac{1.05 - 0.85}{22.22}$$

$$I = 0.009 \text{ A}$$

$$I = 9 \text{ mA}$$

4.2.4 Data Anoda

Anoda sistem proteksi yang digunakan kali ini adalah Anoda dengan jenis Zn. Dikarenakan dengan berat minimal yang ada di pasaran. Maka berat yang akan dipakai pada setiap pipa proteksi akan digunakan sebesar minimal 2 kg.

Anoda Zinc yang dipakai mempunyai karakteristik dimensi sebagai berikut:

Tabel 4.4 Dimensi Produk Anoda Zinc

Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi (cm)	Berat (kg)
15	7.2	3	2

Yang mana juga mempunyai karakteristik ter sendiri yaitu:

Open Potential (Ag/AgCl)	-1.05 Volt
Kapasitas Arus	780 AmpHr/Kg
Laju Konsumsi	11.2 Kg/Amp Year

4.2.5 Data Backfill Anoda

Anoda yang digunakan dapat di tingkatkan nilai efisiensinya dengan menggunakan backfill. Backfill dapat membantu anoda untuk menurunkan tingkat resistivitas lingkungan dan menjaga supaya anoda tetap aktif dan terkorosi secara merata.

Kandungan dari backfill sendiri terdapat beberapa jenis yaitu:

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



- 75% gipsum
- 20% bentonit (lempung)
- 5% sodium sulfat

4.3 Perhitungan Arus dan potensial

Penanaman pipa pada tanah maupun air harus memiliki nilai potensial standar sebuah pipa sebesar -850 mV hingga -1100mV supaya terhindar dari korosi eksternal dikarenakan efisiensinya dalam penggunaannya. Ketika pipa yang ditanam tidak mempunyai nilai tersebut maka diperluakannya sebuah proteksi katodik terhadap sistem tersebut untuk mencapai nilai yang di inginkan. Untuk pengukurannya sendiri digunakan elektroda reference yaitu Cu/CuSO_4 yang di hubungkan ke kutub negatif multester dan juga test point yang dihubungkan pada kutub positif.

Sebelum dilakukan perangkaian sistem proteksi katodik dilakukan pengukuran nilai potensial pipa untuk mengetahui nilai awal apakah pipa berada pada daerah terlindungi atau belum sehingga dapat di berikan proteksi anoda tumbal.

Tabel 4.5 Potensial pipa pada Tanah

Jenis Pipa	Nilai Potensial (mV)
Pipa Coating Primer	-580
Pipa Coaitng Primer dan Sekunder 1 lapis	-620
Pipa Coating Primer dan sekunder 2 lapis	-667

Dari tabel 4.4 diatas diketahui bahwa nilai dari semua coating tidak memenuhi nilai proteksi katodik antara -850mV hingga -1100mV sehingga dibutuhkan proteksi katodik untuk memenuhi angka aman. Pada penelitian ini digunakan metode anoda korban.

Dengan menggunakan sistem proteksi katodik. Pengamatan dilakukan selama 1 bulan dan berlangsung setiap hari untuk mengamati pergerakan nilai potensial dan memastikan



bahwa pipa berada bahwa pada nilai standar proteksi antara -850mV hingga -1100mV.

Pipa yang nilai potensialnya berada di luar standar perlu dilakukan pencegahan supaya pipa yang tertanam pada tanah tidak terkorosi dalam waktu lama dan menyebabkan masalah pada system

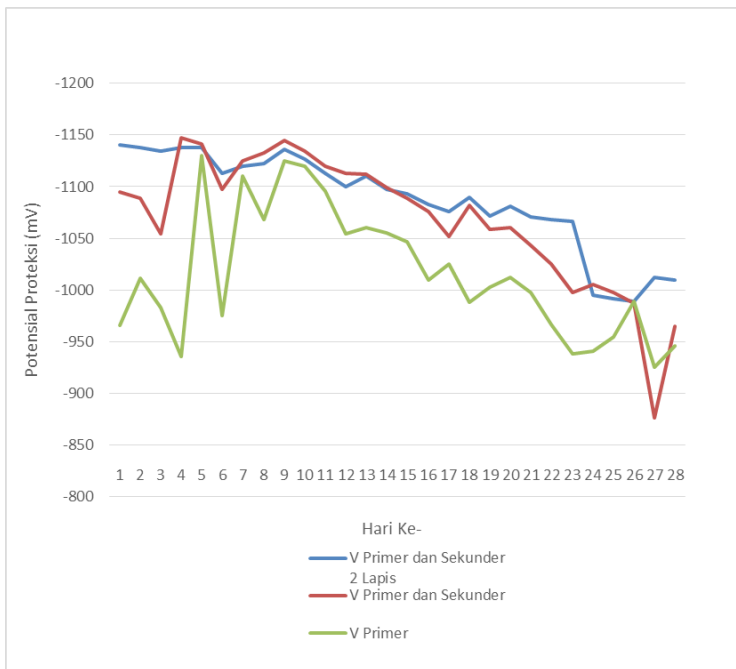
Tabel 4.6 nilai Data proteksi katodik pipa

Hari	V pipa Coating Primer (mV)	V pipa Coating primer dan sekunder 1 lapis (mV)	V pipa Coating primer dan sekunder 2 lapis (mV)
1	-966	-1095	-1095
2	-1011	-1089	-1089
3	-983	-1054	-1054
4	-936	-1147	-1147
5	-1130	-1141	-1141
6	-975	-1097	-1097
7	-1110	-1125	-1125
8	-1068	-1133	-1133
9	-1125	-1145	-1145
10	-1120	-1134	-1134
11	-1096	-1120	-1120
12	-1054	-1113	-1113
13	-1160	-1112	-1112
14	-1055	-1099	-1099
15	-1047	-1089	-1089
16	-1010	-1076	-1076
17	-1025	-1052	-1052
18	-988	-1082	-1082
19	-1003	-1059	-1059
20	-1012	-1060	-1060

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



21	-998	-1043	-1
22	-967	-1025	-1
23	-938	-998	-1
24	-941	-1005	-
25	-955	-998	-
26	-989	-987	-
27	-925	-876	-1
28	-946	-965	-1



Gambar 4.1 Grafik V pipa proteksi



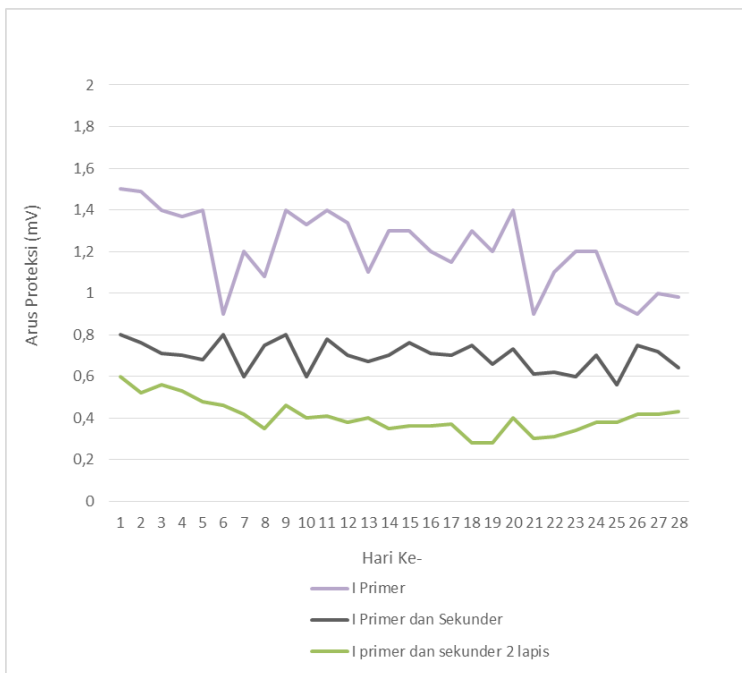
Tabel 4.7 Data Arus Pengujian

Hari	I Pipa Coating Primer (mA)	I Pipa Coating Primer dan Sekunder 1 Lapis (mA)	I Pipa dan S (mA)
1	1,5	0,8	
2	1,49	0,76	
3	1,4	0,71	
4	1,37	0,7	
5	1,4	0,68	
6	0,9	0,8	
7	1,2	0,6	
8	1,08	0,75	
9	1,4	0,8	
10	1,33	0,6	
11	1,4	0,78	
12	1,34	0,7	
13	1,1	0,67	
14	1,3	0,7	
15	1,3	0,76	
16	1,2	0,71	
17	1,15	0,7	
18	1,3	0,75	
19	1,2	0,66	

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



20	1,4	0,73	
21	0,9	0,61	
22	1,1	0,62	
23	1,2	0,6	
24	1,2	0,7	
25	0,95	0,56	
26	0,9	0,75	
27	1	0,72	
28	0,98	0,64	



Gambar 4.2 Data pengujian Arus Pipa

Terlihat pada Tabel dan grafik dimana pipa yang dicoating pada pemasangan diawal hari berada pada garis yang

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



tinggi. Hal ini dikarenakan kondisi pipa dan anoda masih belum sesuai dengan lingkungan tempat ditanam. Pada berjalannya waktu dan kondisi terkontrol. Nilai potensial pipa mulai berarah pada standar nilai yang diinginkan walaupun kondisi angka bergerak secara fluktuatif dan pipa mengalami batas tertinggi di hari awal. Pada hari ke-4 hingga ke-6 terlihat hanya pada pipa primer yang memiliki perubahan sendiri dimana nilainya berubah drastis. Ketika dilakukan pengecekan terdapat kerusakan pada konektor yang menghubungkan antara anoda dan pipa pada test box yang mengakibatkan proteksi katodik tidak bekerja atau salah pengukuran dikarenakan konektor berkarat atau putus. Setelah dilakukan pemasangan ulang pipa, pipa kembali pada nilai potensial pipa relatif aman di sekitar -850 sampai -1100 mV dan nilainya berfluktuatif tidak terlalu jauh. Pada pipa baja dengan hanya coating primer juga berada lebih dekat terhadap pipa baja yang sedang di aliri proteksi ICCP dibandingkan dengan kedua pipa lainnya. Hal ini menyebabkan proteksi arus anoda yang dihasilkan terkena interferensi dari proteksi pipa ICCP yang dibuktikan dengan nilai nya yang tingkat perubahannya lebih tinggi dibandingkan dengan pipa lainnya yang terlihat pada grafik. nilai proteksi ketiga pipa hampir mendekati sama karena kestabilan pipa sudah mulai terbentuk pada hari ke-9. Jika dibandingkan dengan pipa coating yang mendapat proteksi yang berasal dari lapisan coating dan arus dari anoda korban sementara pipa tanpa coating hanya berasal dari arus anoda korban hal tersebut akan sangat mempengaruhi potensial proteksi dari pipa. Dapat disimpulkan pipa coating lebih mudah dikontrol untuk terus berada di zona proteksi, sementara pada pipa tanpa coating pengontrolan arus harus lebih diperhatikan.

Dapat disimpulkan juga bahwa dari hasil pengujian selama 28 hari, pipa yang dikenai coating lapis 2 sekunder hanya membutuhkan arus proteksi yang lebih sedikit dibandingkan dengan pipa yang di coating lapis 1 sekunder maupun yang hanya di lapisi coating primer. Adanya coating pada pipa membuat pipa lebih terproteksi dan membutuhkan arus kecil kisaran 0.3 mA

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN



sampai 0.6 mA. dibandingkan dengan pipa yang dicoating primer dengan penambahan sekunder 1 lapis mempunyai angka 0,6mA hingga 0,8mA, pipa terakhir yaitu yang dicoating hanya primer membutuhkan arus proteksi sekitar 0,9 sampai 1,5 mA.

4.4 Hasil proteksi

Setelah 30 hari, pipa yang telah ditanam dan diberi proteksi arus paksa diangkat untuk mengetahui kondisi pipa.



Gambar 4.3 Pipa coating setelah 30 hari pemberian arus proteksi

Setelah 30 hari proteksi dapat dilihat kondisi yang berbeda. Pada pipa yang diberi coating sekunder kondisi coating pipa masih terlihat baik, tidak mengalami kerusakan walaupun pada prosesnya sempat mengalami over proteksi, namun kondisi pipa tersebut masih baik. Sementara pada pipa yang diberi coating primer terlihat pada beberapa titik terdapat hasil korosi yaitu karat, namun jumlah tersebut tergolong kecil dibanding permukaan luas dari pipa.



Gambar 4.4 Pipa Sekunder 2 lapis mulai mengalami keretakan lapisan coating di beberapa daerah



Gambar 4.5 Pipa Coating dengan 1 lapis sekunder terjadi korosi di titik tertentu



Gambar 4.1 Pipa Coating Primer terdapat karat pada beberapa titik

Terlihat pada gambar diatas beberapa lokasi pada pipa mengalami korosi, namun yang paling jelas terlihat adalah pada sambungan pipa dengan baut sebagai pengait kabel. Pengaruh pengelasan sambungan baut dengan pipa menyebabkan terjadinya perbedaan kondisi pipa *base welding* dengan daerah *welding* Sehingga pada pipa tersebut terjadi korosi galvanis.

Kondisi Cuaca pada lingkungan pun mempengaruhi nilai potensial yang dihasilkan ketika penelitian dimana ketika kondisi pada saat Kering tingkat resistivitas tanahnya lebih tinggi dari resistivitas tanah yang kondisinya basah.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan Perancangan sistem proteksi

Anoda Korban pada penelitian ini adalah:

- 1 Dengan meningkatnya jumlah layer tingkat kebutuhan arus semakin rendah dimana layer Coating Sekunder dengan 2 lapis membutuhkan arus paling kecil yaitu 0.3 mA dengan nilai yang paling tinggi dengan Coating primer dengan 1.5 mA
- 2 Perubahan nilai Resistivitas tanah dan pH dapat mempengaruhi dalam perancangan desain dan kebutuhan arus

5.2 Saran

Saran penulis setelah proses perancangan proteksi katodik untuk meningkatkan penelitian ini adalah

1. Penggunaan sambungan pipa untuk menyambungkan kabel sebaiknya tidak menggunakan las lasan
2. Variabel tambahan pada pipa dapat digunakan pada penelitian berikutnya seperti pengaruh beda anoda, kondisi atau jenis pipa yang digunakan.
3. Pengujian lainnya dapat ditambahkan untuk mengetahui data pengaruh korosi seperti uji Tarik atau uji kekerasan



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Z. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. Butterworth-Henneman.
- ASTM. (2001). *united states of america patent no. g57 standard method for field measurement of soil resistivity using the wenner four - electrode method*.
- bahadori, a. (2014). *cathodic corrosion protection systems: a guide for oil and gas industries*. gulf professional publishing.
- didas, j. (2014). *fundamental of pipeline coatings*. wes virginia: appalachian underground short course.
- fontana, m. g. (1986). *materials science and engineering series: corrosion engineering*. michigan: mcgraw-hill.
- Ge, Y. e. (2008). *Combined coating and sacrificial anode protection for underground steel pipe*. indocor journal.
- gummow, a. (2010). *examining the controversy surround -850mV CP criteria*. pipeline and gas journal.
- jaya, s. (2016). *perancangan sistem proteksi katodik anoda korban pada pipa baja API 5L grade B Coating dan non-coating di dalam tanah menggunakan anoda zinc*. surabaya: its.
- Jones, D. A. (1992). *Principles and Prevention of Corrosion*. Singapore: Macmillan Publishing Company.
- jones, d. a. (1996). *principles and prevention of corrosion*. michigan: prentice hall.
- laboratory, b. (2013). *corrosion and cathodic protection*. denver: bureau of reclamation materials engineering research laboratory.
- NACE. (1997). *TX patent no. RP-0268-97 Electrical isolation of cathodically protected pipelines*. houston.
- NACE. (2012). *TX Patent no. TM0457-2012 Measurement Techniques related to criteria for cathodic protection on*

- underground or submerged metallic piping systems.* houston.
- NACE. (2013). *TX Patent no. SP0169-2013 Control of External Corrosion of Underground or submerged metallic* . houston.
- National Corrosion Service. (2000). *Coating for the Protection of Structural Steelwork*. Teddington: National Physical Laboratory.
- ning, j., & et al. (2014). *a thermodynamic model for the prediction of mild steel corrosion products in an aqueous hydrogen sulfide environment*. athens: ohio university.
- pasaribu, L. (2011). *studi analisis pengaruh jenis tanah, kelembaban, temperatur, dan kadar garam terhadap tahanan pertanahan tanah*. depok: universitas indonesia.
- peabody, A. (2001). *control of pipeline corrosion, second edition*. Texas: NACE Internasional.
- Stress Corrosion Cracking - Metallic Corrosion*. (2001, Februari 22). Diambil kembali dari <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=102>
- Trethewey, K. (1991). *Korosi untuk mahasiswa dan rekayasawan*.
- Whitten, K., & Davis, R. E. (2013). *General Chemistry. 10th penyunt*. Texas: Cengage Learning.

BIODATA PENULIS



Pribadi Ridzky Mulyono lahir di Jakarta, tanggal 05 Desember 1995. Penulis merupakan putra ke 3 dari 3 bersaudara. Menempuh pendidikan formal di TK Bhakti Siwi Jakarta, SDIT Al amanah, SMPN 5 Jakarta, dan SMAN 68 Jakarta. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan perguruan tingginya di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya pada tahun 2013.

Dalam perkuliahan di ITS, penulis juga aktif di beberapa kegiatan ekstrakurikuler, diantaranya di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT), AIESEC.

Pengalaman kerja yang pernah diikuti penulis yaitu kerja praktek di *INDONESIA POWER* pada bulan Juni hingga Agustus 2016. Penulis dapat dihubungi melalui 087876682624 dan email pribadiridzky123@gmail.com.